

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ВИХІВСЬКА КАТЕРИНА МИКОЛАЇВНА

УДК 502

ДИСЕРТАЦІЯ
РЕКУЛЬТИВАЦІЯ ТЕХНОГЕННО ПОШКОДЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ В
МЕЖАХ БІОСФЕРНОГО РЕЗЕРВАТУ «РОЗТОЧЧЯ»

101 – Екологія
10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ / К.М.Вихівська / (підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Нагурський Олег Антонович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Вихівська К.М.. Рекультивация техногенно поврежденных территорий в межах біосферного резервату «Розточчя». - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 101 «Екологія». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

В дисертаційному дослідженні розв'язане актуальне науково-практичне завдання: відновлення екосистеми техногенно-пошкодженої території ліквідованого сірко видобувного підприємства.

Досліджені техногенні аспекти функціонування хвостосховищ сірчаного виробництва. Встановлено, що масштабне виробництво сірки флотаційним методом призвело до накопичення значних обсягів відходів у хвостосховищах, що становлять серйозну екологічну загрозу. Основними проблемами є хімічне забруднення води та ґрунту, утворення кислотного дренажу, виділення токсичних газів. Промислова діяльність Яворівського ДГХП «Сірка» спричинила деградацію ґрунтів, забруднення водних ресурсів, фрагментація лісових масивів та скорочення біорізноманіття екосистеми, які увійшли до біосферного резервату «Розточчя».

Порівняльний аналіз природних та техногенних екосистем вказує на різке зниження рівня екологічної стійкості в зонах промислового впливу. Водночас дослідження показали наявність природних процесів сукцесії, що свідчить про можливість екологічної реабілітації територій

Показано, що у техногенних екосистемах біотичний потенціал є низьким. Забруднені та засолені ґрунти хвостосховищ, нестача поживних речовин і води, високий рівень токсичних речовин суттєво обмежують можливості розвитку флори та фауни. Процеси природної сукцесії проходять повільно, і без проведення рекультиватії відновлення екосистеми може буди надто тривалим.

Проведений аналіз стану рослинного покриву показав, що на території хвостосховища спостерігається значна варіація в стані рослинного покриву залежно від зони. Центральна частина хвостосховища є найбільш забрудненою та деградованою, з низьким рівнем рослинного покриття та значними ознаками токсичного стресу в рослинах. В околицях процес відновлення йде повільно, а в перехідній зоні до природних екосистем спостерігається значне поліпшення стану рослинності.

Дослідження абіотичних компонентів екосистеми хвостосховища показали значні відхилення від природних норм, характерних для резервату «Розточчя». Зокрема, ґрунтовий покрив хвостосховища відзначається низькою пористістю (41,56%), що перешкоджає ефективному формуванню рослинного покриву. Показники густини поверхневого шару становить $1,42 \text{ кг/м}^3$, що унеможливорює розвиток деревної рослинності. Практична відсутність гумусу свідчить про низький рівень родючості ґрунту. Хімічний склад поверхневих порід демонструє високу концентрацію сірки (28,55%) і кальцію (68,83%), що вказує на необхідність проведення рекультиваційних заходів для покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту та відновлення природних екосистем.

Для оцінювання видової різноманітності розраховували індекс Шеннона $H=1,28$ та коефіцієнт сукцесії $K=0,19$ показали, що центральна частина хвостосховища має найнижчі показники біотичного потенціалу самовідновлення.

Рекультивація посттехногенних територій відповідає Цілям сталого розвитку України, законодавству України та Європейського Союзу та має на меті забезпечення екологічної безпеки та відновлення деградованих земель для їх подальшого продуктивного використання. Українське законодавство регулюється рядом актів, включаючи Земельний кодекс, закони про охорону природи та відходи, що встановлюють обов'язки щодо рекультивації. Гармонізація з європейськими стандартами, зокрема через Угоду про асоціацію, сприяє удосконаленню законодавства та впровадженню принципів

«забруднювач платить», що важливо для забезпечення сталого розвитку і екологічної безпеки.

Для ефективного відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» визначили склад первинних продуцентів, які здатні виживати за низьких значень рН ґрунту, сприяють накопиченню органічної речовини та покращенню його структури, стійкі до забруднень важкими металами й засолення, виконують біоремедіацію та азотфіксацію, а також формують стабільний рослинний покрив, що запобігає ерозії та підтримує гідрологічний режим. Це комбінація трав'янистих (Щучник дернистий (*Deschampsia caespitosa*), Костриця червона (*Festuca rubra*), Мітлиця тонка (*Agrostis tenuis*), Лядвенець рогатий (*Lotus corniculatus*), Конюшина біла (*Trifolium repens*)), чагарникових (Обліпіха крушиновидна (*Hippophae rhamnoides*)) та деревних видів (Береза повисла (*Betula pendula*), Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*)).

На основі проведених екосистемних досліджень території хвостосховища, вивчення стану рослинності, умов ґрунтового середовища та оцінювання біотичного потенціалу було запропоновано проводити рекультивацію за таким алгоритмом:

Етап 1: Геотехнічна підготовка: облаштування дороги через дамбу хвостосховища для можливості проїзду інженерної техніки до місця проведення робіт; вирівнювання поверхні та засипання провалів; формування каналів під висаджування дерев.

Етап 2. Формування рекультиваційного шару: покриття поверхні родючим шаром ґрунту; біологічна ремедіація за допомогою бактерій і грибів, що сприяють приживленню рослин та їх ефективному росту.

Етап 3: Посів трав'янистих рослин: висівання піонерних видів для стабілізації ґрунту та покращення водоутримуючих властивостей ґрунту.

Етап 4: Висаджування дерев.

Етап 5: Моніторинг і коригування заходів.

Запропонована методика була застосована під час проведення рекультивації частини хвостосховища виробництва сірки флотаційним методом ліквідованого Яворівського ДГХП «Сірка».

Для підвищення життєздатності первинних продуцентів та поліпшення агротехнічних характеристик ґрунту проводили інокуляцію рослин сумішами бактеріальних препаратів міковітал, планриз-біо, азотфіксатор, флорабацилін, молочна сироватка та добрива «агроболік універсал».

На території площею 6000 м² була проведена геотехнічна підготовка, формування рекультиваційного шару та висаджено 600 саджанців сосни та 400 саджанців берези. Це створює передумови для повного відновлення природної екосистеми та подальшого використання земель у господарській або природоохоронній діяльності.

Ключові слова: хвостосховище, рекультивація, Яворівський ДГХП «Сірка», біосферний резерват «Розточчя»

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1.Korbut M. Implementation of European union directives on waste management into Ukrainian legislation within the association agreement. / Korbut, M., Malovanyu, M., Luchyt, L., Vykhivska, K. Environmental Problems, 2024. Vol. 9, № 2. P. 101–108. (SciVerse SCOPUS).

2.Nahurskyi O., Vykhivska K., Krylova H., Vasiichuk V., Kachan S., Nahursky A., Bogatov O., Pavlenko O., Orobchuk O. Study of ecosystem Edaphic components in the tailings storage of a decommissioned sulfur mining enterprise. Ecol. Eng. Environ. Technol. 2025. 4. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/200623> (SciVerse SCOPUS Q3).

Які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

3.Oliferchuk V., Samarska M., Nagursky O., Vasiichuk V., Vykhivska K. Reclamation of technogenically damaged territories of a sulfur production enterprise using the method of stimulating microisogenesis in plants // 4th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering – 2023», Lviv, June 26-29, 2023.

4.Нагурський О. А., Вихівська К. М., Васійчук В. О., Качан С. І. Екологічні проблеми ліквідованого сірчаного виробництва та методи їх вирішення // Сталий розвиток – стан та перспективи : збірник матеріалів IV Міжнародного наукового симпозіуму в рамках Еразмус+ Модуль Жан Моне «Концепція екосистемних послуг: Європейський досвід» («EE4CES»), 13–16 лютого 2024, Україна, Львів – Славське. – 2024. – С. 262–265.;

5.Вихівська К.М., Нагурський О.А. Технологічні аспекти рекультивації порушених територій хвостосховищ сіркодобувних підприємств // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. IX Міжнародний молодіжний конгрес, 28-29 березня 2024, Україна, Львів. . – 2024. – С. 237;

6.Нагурський О.А., Вихівська К.М., Обґрунтування первинного складу продуцентів для відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. X Міжнародний молодіжний конгрес, 27-28 березня 2025, Україна, Львів. . – 2025. – С. 237

ANNOTATION

Vykhivska K.M. Reclamation of Technogenically Damaged Areas Within the "Roztochchia" Biosphere Reserve. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 10 "Natural Sciences," specialty 101 "Ecology." – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

This dissertation addresses a relevant scientific and practical issue: the restoration of the ecosystem of a technogenically damaged area at a decommissioned sulfur mining enterprise.

The study explores the technogenic aspects of tailings storage facilities from sulfur production. It was established that large-scale sulfur production using the flotation method has led to the accumulation of vast amounts of waste in tailings ponds, posing significant environmental threats. Key issues include chemical contamination of water and soil, acid drainage formation, and the release of toxic gases. The industrial activity of the Yavoriv State Mining and Chemical Enterprise "Sirka" caused soil degradation, water pollution, fragmentation of forest areas, and biodiversity loss within the "Roztochchia" biosphere reserve.

A comparative analysis of natural and technogenic ecosystems shows a sharp decline in ecological stability in industrial impact zones. However, the research revealed signs of natural succession processes, indicating the possibility of ecological rehabilitation.

It was shown that technogenic ecosystems possess low biotic potential. Contaminated and saline tailings soils, lack of nutrients and water, and high levels of toxic substances significantly hinder the development of flora and fauna. Natural succession progresses slowly, and without reclamation, ecosystem recovery may take excessively long.

Analysis of the vegetation cover condition showed significant variation depending on the zone. The central part of the tailings pond is the most polluted and degraded, with low vegetation coverage and clear signs of toxic stress in plants. In

the surrounding areas, recovery is slow, while the transitional zone toward natural ecosystems demonstrates notable improvement.

Studies of the abiotic components in the tailings ecosystem revealed significant deviations from natural standards typical for the Roztochchia reserve. In particular, tailings soil exhibited low porosity (41.56%), impeding effective vegetation formation. The surface layer density was 1.42 kg/m³, which prevents the development of woody vegetation. The practical absence of humus indicates extremely low soil fertility. The chemical composition of the surface layer shows high concentrations of sulfur (28.55%) and calcium (68.83%), necessitating reclamation measures to improve soil physicochemical properties and restore natural ecosystems.

Species diversity was assessed using the Shannon Index ($H = 1.28$) and the succession coefficient ($K = 0.19$), indicating that the central part of the tailings area has the lowest biotic self-recovery potential.

Reclamation of post-technogenic areas aligns with Ukraine's Sustainable Development Goals, national legislation, and European Union standards, aiming to ensure environmental safety and restore degraded lands for productive use. Ukrainian legislation, including the Land Code and laws on environmental protection and waste management, mandates reclamation efforts. Harmonization with EU standards, particularly through the Association Agreement, promotes legal improvements and the implementation of the "polluter pays" principle, which is vital for sustainable development and environmental safety.

To effectively restore the ecosystem of the Yavoriv "Sirka" tailings pond, a set of primary producers was identified—species capable of surviving low soil pH, contributing to organic matter accumulation and soil structure improvement, resistant to heavy metal contamination and salinity, performing bioremediation and nitrogen fixation, and forming a stable vegetation cover to prevent erosion and support the hydrological regime. This includes a combination of herbaceous species (*Deschampsia caespitosa*, *Festuca rubra*, *Agrostis tenuis*, *Lotus corniculatus*,

Trifolium repens), shrubs (Hippophae rhamnoides), and tree species (Betula pendula, Pinus sylvestris).

Based on ecosystem research of the tailings area, vegetation condition, soil environment, and biotic potential assessment, a reclamation algorithm was proposed:

Stage 1: Geotechnical preparation – constructing a road through the tailings dam to allow engineering equipment access, leveling the surface, filling subsidence areas, and forming channels for tree planting.

Stage 2: Formation of the reclamation layer – covering the surface with fertile soil; biological remediation using bacteria and fungi to enhance plant survival and growth.

Stage 3: Sowing herbaceous plants – sowing pioneer species to stabilize the soil and improve its water retention properties.

Stage 4: Tree planting.

Stage 5: Monitoring and adjusting the measures.

The proposed methodology was applied during reclamation of a section of the flotation-method sulfur tailings pond of the decommissioned Yavoriv State Mining and Chemical Enterprise "Sirka."

To enhance the viability of primary producers and improve agrotechnical characteristics of the soil, plants were inoculated with a mixture of bacterial preparations (Mycovital, Planriz-Bio, Azotfixator, Florabacillin), whey, and the fertilizer "Agrobolik Universal."

On a 6,000 m² area, geotechnical preparation was performed, a reclamation layer was formed, and 600 pine and 400 birch saplings were planted. This creates the preconditions for full restoration of the natural ecosystem and further use of the land for economic or conservation purposes.

Key words: tailings pond, reclamation, State Mining and Chemical Enterprise Yavoriv "Sirka", Roztochchia biosphere reserve

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

In which the main scientific results of the dissertation are published:

1.Korbut M. Implementation of European union directives on waste management into Ukrainian legislation within the association agreement. / Korbut, M., Malovanyy, M., Luchyt, L., Vykhivska, K. Environmental Problems, 2024. Vol. 9, № 2. P. 101–108. (SciVerse SCOPUS).

2.Nahurskyi O., Vykhivska K., Krylova H., Vasiichuk V., Kachan S., Nahursky A., Bogatov O., Pavlenko O., Orobchuk O. Study of ecosystem Edaphic components in the tailings storage of a decommissioned sulfur mining enterprise. Ecol. Eng. Environ. Technol. 2025. 4. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/200623> (SciVerse SCOPUS Q3).

Which certify the approval of the dissertation materials:

3.Oliferchuk V., Samarska M., Nagurskyy O., Vasiichuk V., Vykhivska K. Reclamation of technogenically damaged territories of a sulfur production enterprise using the method of stimulating microisogenesis in plants // 4th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering – 2023», Lviv, June 26-29, 2023.

4.Nahurskyi O. A., Vykhivska K. M., Vasiichuk V. O., Kachan S. I. Ekologichni problemy likvidovanoho sirchanoho vyrobnytstva ta metody yikh vyrishennia // Stalyi rozvytok – stan ta perspektyvy : zbirnyk materialiv IV Mizhnarodnoho naukovooho sympoziumu v ramkakh Erasmus+ Modul Zhan Mone «Kontsepsiia ekosystemnykh posluh: Yevropeyskyi dosvid» («EE4CES»), 13–16 liutoho 2024, Ukraina, Lviv – Slavske. – 2024. – S. 262–265.

5.Vykhivska K. M., Nahurskyi O. A. Tekhnologichni aspekty rekultyvatsii porushenykh terytorii khvostoskhovysh sirkodobuvnykh pidpriemstv // Stalyi rozvytok: zakhyst navkolyshnoho seredovyshcha. Enerhooshchadnist. Zbalansovane

pryrodokorystuvannia. IX Mizhnarodnyi molodizhnyi konhres, 28–29 bereznia 2024, Ukraina, Lviv. – 2024. – S. 237.

6.Nahurskyi O. A., Vykhyvska K. M. Obgruntuvannia pervynnoho skladu produsentiv dlia vidnovlennia ekosystemy khvostoskhovyshcha Yavorivskoho DGHK «Sirka» // Stalyi rozvytok: zakhyst navkolyshnoho seredovyshcha. Enerhooshchadnist. Zbalansovane pryrodokorystuvannia. X Mizhnarodnyi molodizhnyi konhres, 27–28 bereznia 2025, Ukraina, Lviv. – 2025. – S. 237.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	22
1.1. Аналіз впливу техногенної діяльності сірко видобувних підприємств на довкілля	22
1.2. Еколого-технічні аспекти рекультивації пошкоджених територій	27
1.3. Відновлення життєдіяльності екосистеми	34
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ. МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ	48
2.1. Загальна характеристика об'єкту та предмету дослідження	48
2.2. Характеристика речовин, які використовувалися у дослідженнях	50
2.2.1. Нітроамофоска	50
2.2.2. Агроболік універсал	51
2.2.3. Міковітал	52
2.2.4. Щучник дернистий (<i>Deschampsia caespitosa</i>)	52
2.2.5. Костриця червона (<i>Festuca rubra</i>)	53
2.2.6. Мітлиця тонка (<i>Agrostis tenuis</i>)	54
2.2.7. Обліпіха крушиновидна (<i>Hippophae rhamnoides</i>)	55
2.2.8. Береза повисла (<i>Betula pendula</i>)	56
2.2.9. Сосна звичайна (<i>Pinus sylvestris</i>)	57
2.3. Методика проведення експериментальних досліджень	58
2.3.1. Методика відбору проб ґрунту	58
2.3.2. Визначення густини ґрунту	60
2.3.3. Визначення густини твердої фази ґрунту	61
2.3.4. Визначення пористості ґрунту	63

2.3.5. Визначення рН ґрунту	64
Висновки до розділу 2	67
РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ХВОСТОСХОВИЩА СІРЧАНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ТЕРИТОРІЇ РЕЗЕРВАТУ «РОЗТОЧЧЯ»	68
3.1 Технологічні особливості функціонування хвостосховища	69
3.2 Екосистемна характеристика території хвостосховища	71
Висновки до розділу 3	81
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ ХВОСТОСХОВИЩА ЯВОРІВСЬКОГО ДГХП «СІРКА»	83
4.1. Дослідження стану рослинності території хвостосховища	84
4.2. Визначення основних показників фізико-хімічних властивостей поверхневого шару ґрунту хвостосховища	89
4.3. Оцінка біотичного потенціалу	97
Висновки до розділу 4	100
РОЗДІЛ 5. ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОСИСТЕМИ ХВОСТОСХОВИЩА ЯВОРІВСЬКОГО ДГХП «СІРКА»	101
5.1 Законодавство України та ЄС з питань рекультивації пошкоджених територій	102
5.2 Обґрунтування первинного складу продуцентів для відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка»	108
5.3 Технологічні аспекти відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка»	113
5.3.1. Геотехнічна підготовка поверхні хвостосховища	114
5.3.2. Формування рекультиваційного шару	117
5.3.3. Висівання трав'янистих рослин	119
5.3.4. Висаджування дерев	120
5.3.5. Догляд за рослинами та моніторинг екологічного стану	121

рекультивованої території	
Висновки до розділу 5	122
ВИСНОВКИ	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	126
ДОДАТКИ	142

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасних умовах глобального екологічного занепокоєння збереження довкілля є однією з найважливіших проблем людства. Інтенсивна діяльність промислових підприємств, зокрема видобування корисних копалин, лісозаготівля, забудова та інші форми антропогенного навантаження, завдають значної шкоди природним екосистемам. Внаслідок цього відбувається деградація ландшафтів, забруднення природного середовища, знищення флори і фауни, порушення структури ґрунтів та гідрологічного режиму територій. Особливо гостро ця проблема постає в регіонах, які мають важливе природоохоронне значення.

Біосферний резерват «Розточчя» є унікальним природним комплексом, включеним до мережі ЮНЕСКО, і відіграє важливу роль у збереженні екосистем Західної України. Однак частина його територій зазнала значного антропогенного впливу внаслідок діяльності Яворівського ДГХП «Сірка», яке у другій половині XX століття здійснювало масштабний відкритий видобуток сірки. У результаті цього були утворені кар'єри, відвали, кислотні водойми та інші об'єкти техногенного походження, які продовжують чинити негативний вплив на довкілля. Це призвело до порушення природного середовища, зниження рівня екологічної стійкості територій та загрози для збереження цінних природних комплексів.

У зв'язку з цим виникає нагальна потреба у здійсненні рекультивації техногенно пошкоджених земель — процесу відновлення природного середовища на порушених ділянках із метою повернення їм екологічної та господарської цінності. Рекультивація є комплексним підходом, що охоплює екологічні, інженерні, біологічні та соціально-економічні аспекти. В межах біосферного резервату такий процес потребує особливо ретельного підходу, оскільки будь-яке втручання має відповідати принципам сталого розвитку й природоохоронної політики.

Дослідження, присвячене рекультивації пост техногенних територій в межах біосферного резервату «Розточчя», є актуальним з причин збереження та відновлення природних ресурсів регіону, сприяння покращенню екологічного стану довкілля. Рекультивація відіграє важливу роль у процесах адаптації до змін клімату, сприяє зміцненню екосистем, підвищує їхню стійкість до кліматичних стресів. Такі дослідження мають прикладне значення для екологічної політики України в контексті реалізації міжнародних природоохоронних зобов'язань.

Тому вирішення проблеми відновлення пост техногенних територій у межах біосферного резервату «Розточчя» залишається актуальною і, вважаючи на масштаби порушень - невідкладної для запобігання екологічної кризи та виникнення нових загроз для безпеки людини.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку кафедри «Цивільної безпеки» Національного університету «Львівська політехніка» «Переробка та утилізація відходів, ресурсо- та енергозбереження, фізико-математичне моделювання, контроль та захист довкілля від забруднень» і виконувалась в межах Міжнародної кліматичної ініціативи (ІКІ) за підтримки Федерального міністерства довкілля, збереження природи та ядерної безпеки Німеччини (BMU) на основі рішення, прийнятого Бундестагом Німеччини. Проект впроваджений Фондом Міхаеля Зуккова та Університетом сталого розвитку м. Еберсвальде з Німеччини разом з місцевою НГО «Природа Розточчя», а також кафедрою Цивільної безпеки, Інституту сталого розвитку, НУ «Львівська політехніка».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є аналіз екологічного стану техногенно порушених територій в районі впливу Яворівського ДГХП «Сірка», та розроблення обґрунтованих підходів до їх рекультивації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати екологічні наслідки діяльності Яворівського ДГХП

«Сірка» з видобутку сірки флотаційним методом у межах біосферного резервату «Розточчя».

- визначити основні проблеми техногенного забруднення територій, зокрема хвостосховищ: хімічне забруднення ґрунтів і вод, токсичний вплив на рослинність, деградація ґрунтів.
- провести експериментальне дослідження рослинного покриву та ґрунтів хвостосховища, виявити рівень забруднення, токсичності та потенціал природного самовідновлення.
- дослідити нормативно-правові аспекти рекультивації техногенно пошкоджених земель у контексті українського та європейського законодавства.
- обґрунтувати доцільність застосування біологічних методів рекультивації, зокрема інокуляції рослин бактеріальними препаратами для відновлення структури та родючості ґрунту.
- розробити та реалізувати практичну модель рекультивації деградованої території на прикладі хвостосховища, включаючи геотехнічну підготовку, формування родючого шару та висадку деревної рослинності.

Об'єкт дослідження – хвостосховище виробництва сірки флотаційним методом на Яворівському ДГХП «Сірка».

Предмет дослідження – технологічні та екологічні аспекти рекультивації техногенно пошкоджених територій хвостосховища.

Методи досліджень включають в себе розроблені та апробовані методики експериментальних досліджень: відбір проб ґрунту проводили згідно правил, що забезпечило їх репрезентативність для всієї досліджуваної ділянки та порівнянність результатів; густину ґрунту визначали термоваговим методом; Визначення рН ґрунтового розчину здійснювали потенціометричним методом. Коректність результатів підтверджувалась 4-х кратною повторюваністю експериментальних досліджень. Оцінку достовірності та інтерпретацію результатів проводили за допомогою та статистичного аналізу. Для аналізу отриманих даних застосовувався програмний пакет Microsoft Office Excel 2013.

Наукова новизна одержаних результатів. З ціллю відновлення техногенно порушених територій дисертантом отримані такі найбільш важливі наукові результати:

вперше:

- експериментально досліджено екосистемні характеристики території функціонування об'єктів Яворівського ДГХП «Сірка», що дало змогу встановити рівень екологічної стійкості в зонах промислового впливу та зробити висновок про можливість екологічної реабілітації територій;
- проведено оцінку біотичного потенціалу пост техногенної екосистеми хвостосховища виробництва сірки флотаційним методом Яворівського ДГХП «Сірка», що дало змогу визначити можливість природного самовідновлення для повної реабілітації екосистеми;

набули подальшого розвитку

- технології рекультивації пошкоджених територій з врахуванням їх фізико-хімічних та біологічних особливостей;
- дослідження щодо мінімізації негативного впливу ліквідованих сірко-видобувних підприємств на довкілля.

Практичне значення одержаних результатів. На основі проведених екосистемних досліджень, вивчення стану рослинності, умов ґрунтового середовища та оцінювання біотичного потенціалу було запропоновано алгоритмом проведення рекультивації.

Запропонована методика була застосована під час проведення рекультивації частини хвостосховища виробництва сірки флотаційним методом ліквідованого Яворівського ДГХП «Сірка» в межах Міжнародної кліматичної ініціативи (IKI) за підтримки Федерального міністерства довкілля, збереження природи та ядерної безпеки Німеччини (BMU)

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи використані у програмі лекційного курсу «Промислова екологія», а саме у розділі «Захист земельних ресурсів», оскільки отримані результати стосуються забруднення територій накопичувачами відходів та їх рекультивації. для спеціальності 263

«Цивільна безпека» в Національному університеті «Львівська політехніка» (Додаток 1).

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто опрацьовано літературні джерела за темою дисертації, розроблено методологію дослідження, проведено моніторингові, лабораторні та польові дослідження, систематизовано й узагальнено експериментальний матеріал, сформульовано науково обґрунтовані висновки. Постановка задач, розроблення методик дослідження процесів та технологій мінімізації екологічної небезпеки, обговорення поставлених задач проводились під керівництвом д.т.н., проф. Олега Нагурського, зав.кафедри цивільної безпеки Національного університету «Львівська політехніка».

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на таких міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: 4th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering – 2023», Lviv, June 26-29, 2023, IV Міжнародний науковий симпозіум в рамках Еразмус+ Модуль Жан Моне «Концепція екосистемних послуг: Європейський досвід» («EE4CES»), 13–16 лютого 2024, Україна, Львів – Славське; IX Міжнародний молодіжний конгрес: Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування., 28-29 березня 2024, Україна, Львів; X Міжнародний молодіжний конгрес: Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування., 27-28 березня 2025, Україна, Львів.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 6 друкованих наукових праць, 2 публікації у виданнях, що входять до наукометричних баз даних (Scopus), у тому числі 1 – у виданні, віднесеному до третього квартилю (Q3) і прирівнюється до двох наукових публікацій, 6 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та

додатків. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 145 сторінках машинописного тексту, ілюстровано 13 рисунками, текст містить 6 таблиць, у бібліографії наведено 131 літературне джерело, дисертація містить 1 додаток.

РОЗДІЛ І

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Аналіз впливу техногенної діяльності сірко видобувних підприємств на довкілля

Забруднення повітря в промислових зонах та населених пунктах, що знаходяться поблизу сірко видобувних підприємств, є суттєвою проблемою. Викиди сірководню, діоксиду сірки та інших газів мають значний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей. Викиди погіршують якість повітря, спричиняючи розвитку респіраторних захворювань у людей, таких як бронхіальна астма, що за даними ВООЗ, вражає близько 300 мільйонів людей у всьому світі. Постійний вплив цих токсичних речовин також підвищує ризик виникнення алергій та онкологічних захворювань. Сірководень, що утворюється під час видобутку та переробки сірки, є надзвичайно токсичним газом із сильним отруйним впливом на організм людини [1].

Крім того, діоксид сірки, який утворюється внаслідок окислення сірки під час її переробки та транспортування, сприяє розвитку кислотних дощів. Взаємодія SO_2 з водяною парою в атмосфері призводить до утворення сірчаної кислоти, яка, випадаючи у вигляді кислотних дощів, негативно впливає на рослинність, ґрунти та водні об'єкти. Згідно з даними, кислотні дощі можуть знижувати родючість ґрунтів до 30%, пошкоджуючи лісові масиви та викликаючи деградацію екосистем.

Забруднення водних ресурсів, пов'язаних із видобутком сірки, відбувається внаслідок скидання стічних вод із високим вмістом шкідливих речовин, таких як сірчана кислота, сульфати та інші токсичні елементи, що негативно впливають на водні екосистеми та якість ґрунтових вод.

За даними досліджень, в Україні щорічно скидається близько 1,5 мільйона кубічних метрів стічних вод із високим вмістом сірчаної кислоти та сульфатів. Ці

речовини є надзвичайно агресивними й можуть призвести до закислення водних ресурсів. Сірчана кислота, потрапляючи у водойми, спричиняє значному підвищенню кислотності, що негативно впливає на флору та фауну водних екосистем.

Висока кислотність вод може призвести до загибелі водних організмів, особливо риб, молюсків та інших чутливих видів. Наприклад, у ряді водойм, під впливом кислотних дощів та скидання стічних вод, зафіксовано зниження популяцій риб до 40%. Це також порушує біогеохімічні цикли в екосистемах водойм, знижуючи їхню стійкість та здатність до відновлення. Такі зміни можуть бути незворотними, якщо вчасно не вжити заходів для нейтралізації кислоти [2].

Окрім поверхневих водних об'єктів, стічні води сірководобувних підприємств можуть проникати в ґрунт і забруднювати ґрунтові води. За статистикою, до 30% стічних вод можуть потрапити в водоносні шари, що особливо небезпечно для регіонів, де ґрунтові води є основним джерелом питної води для населення. Потрапляння сульфатів і токсичних сполук у водоносні шари призводить до погіршення якості питної води, що може негативно позначитися на здоров'ї місцевого населення, викликаючи серйозні захворювання, пов'язані з тривалим споживанням забрудненої води [2].

Проблема забруднення водних ресурсів від сірководобувної діяльності є надзвичайно важливою для екосистем і людських спільнот. Для її вирішення необхідне впровадження сучасних технологій очищення стічних вод і захисту водоносних шарів від токсичного забруднення.

Забруднення ґрунтів внаслідок діяльності сірководобувних підприємств спричинене значним накопиченням сірки та сульфатів у ґрунтах прилеглих територій. Це відбувається через викиди в атмосферу та стоки у воду, які після осадження або потрапляння в ґрунт призводять до погіршення його фізичних і хімічних властивостей [1]. Сірка та сульфати, накопичуючись у ґрунтах, змінюють їхню кислотність, що негативно впливає на здатність рослин

поглинати поживні речовини. Це також викликає руйнування ґрунтової структури, знижуючи його аерацію та водопроникність.

Одним із основних наслідків накопичення сірки та сульфатів у ґрунтах є погіршення їхньої родючості. Підвищена кислотність ґрунтів призводить до зниження врожайності сільськогосподарських культур на 30-50%, оскільки рослини не можуть ефективно поглинати поживні речовини з ґрунту. Це стає серйозною проблемою для сільськогосподарських регіонів, де ґрунти забруднені внаслідок сірко видобувної діяльності, оскільки це ставить під загрозу продовольчу безпеку регіону. Деградовані ґрунти стають непридатними для вирощування багатьох культур, що вимагає великих витрат на їхнє відновлення та підтримку родючості.

Накопичення сірки та сульфатів у ґрунтах не лише погіршує їхню родючість, але й створює ризики для забруднення продуктів харчування, вирощених на таких землях. Рослини, вирощені на забруднених ґрунтах, можуть поглинати токсичні речовини, які потрапляють у харчовий ланцюг. Це може призвести до серйозних наслідків для здоров'я споживачів, особливо якщо йдеться про тривале споживання продуктів, забруднених токсинами. За оцінками, до 20% сільськогосподарських культур можуть містити підвищені рівні сірки та сульфатів, що є небезпечними для здоров'я людини.

Проблема забруднення ґрунтів потребує комплексного підходу до відновлення та рекультивації, зокрема використання біологічних, хімічних та фізичних методів для відновлення їхньої родючості [1].

Видобуток сірки супроводжується утворенням значних обсягів пустої породи - матеріалу, що не має корисних компонентів, але потребує зберігання або утилізації [3]. Окрім цього, під час виробничого процесу утворюються різні види промислових відходів, які можуть містити небезпечні речовини. Накопичення таких відходів на хвостосховищах або промислових полігонах створює екологічні ризики, особливо якщо зберігання не відповідає екологічним стандартам [4].

Відходи, що містять токсичні речовини, можуть залишатися небезпечними для навколишнього середовища протягом тривалого часу. За оцінками, до 40% відходів сірководобувних підприємств не утилізуються належним чином. Недостатня кількість спеціалізованих полігонів для їхнього зберігання призводить до перенавантаження існуючих сховищ, що збільшує ризик забруднення. Крім того, неправильна утилізація або захоронення можуть стати джерелом довготривалого забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери.

Неправильне зберігання та утилізація відходів становлять серйозну загрозу для екосистем та здоров'я людей. Пусті породи та інші виробничі відходи можуть виділяти токсичні речовини, які забруднюють ґрунти, підземні води та поверхневі водойми. Це особливо небезпечно в районах, де зберігаються великі обсяги відходів без належної ізоляції або спеціальних захисних споруд. Забруднення може відбуватися поступово, але його наслідки можуть бути катастрофічними для місцевих екосистем, спричиняючи деградацію ґрунтів, втрату біорізноманіття та погіршення якості водних ресурсів [5].

Проблема утворення відходів у сірко видобувній промисловості потребує впровадження сучасних технологій для їхньої безпечної утилізації та зберігання, а також постійного моніторингу впливу відходів на навколишнє середовище.

Видобуток сірки значно впливає на природне середовище, спричиняючи вичерпання корисних копалин, руйнування ландшафтів та деградацію екосистем. Це призводить до незворотних змін у природних системах, які вимагають тривалого відновлення.

Родовища сірки є обмеженими, і їхній інтенсивний видобуток призводить до швидкого вичерпання. Процес видобутку призводить до виснаження запасів сірки, що в довгостроковій перспективі може загрожувати економічній стабільності регіонів, де видобуток є основою економічної діяльності.

Окрім економічних наслідків, вичерпання родовищ створює екологічні проблеми, оскільки після завершення видобутку залишаються величезні площі порушених земель, які потребують рекультивациі та відновлення.

Окрім виснаження природних ресурсів, сірковидобувна діяльність значно змінює природний ландшафт. Відкриті кар'єри, хвостосховища та відвали пустої породи радикально змінюють рельєф територій, де проводяться видобувні роботи [6]. Близько 20% території, де ведеться видобуток, зазнає руйнувань, що призводить до знищення місць проживання багатьох видів тварин та рослин. Втрата біорізноманіття та деградація екосистем, зумовлені зміною ландшафту, стають серйозними екологічними викликами для регіонів, де здійснюється видобуток сірки.

Руйнування екосистем також впливає на гідрологічні процеси: зникають природні водозбірні басейни, порушується водний баланс, що спричиняє зменшення водних ресурсів [7]. Це особливо критично для регіонів із нестачею води, де видобуток може призводити до посушливих умов. Згідно з дослідженнями, у деяких регіонах зниження водних ресурсів може досягати 30% внаслідок сірковидобувної діяльності.

Таким чином, виснаження природних ресурсів і руйнування ландшафтів потребують ретельного планування заходів з рекультивації та збереження природного середовища [8]. Важливо забезпечити впровадження сучасних технологій, які зменшують негативний вплив на довкілля та дозволяють відновлювати порушені екосистеми після завершення видобувних робіт.

Сірковидобувна діяльність має серйозний негативний вплив на здоров'я людей, які проживають у районах, де ведуться видобувні роботи. Токсичні викиди, що утворюються під час видобутку та переробки сірки, мають значний вплив на організм людини, викликаючи респіраторні, алергічні та інші серйозні захворювання.

Тривалий вплив цих речовин на організм людини може спричиняти розвиток хронічних респіраторних захворювань, таких як бронхіальна астма, хронічний бронхіт та алергії [9]. Висока концентрація сірководню в повітрі може також спричиняти короточасні серйозні ураження, включаючи задуху, набряк легенів та пошкодження дихальних шляхів.

Токсичні речовини, що виділяються в процесі сірковидобування, можуть безпосередньо контактувати з шкірою та слизовими оболонками, спричиняючи їх подразнення. Постійний контакт з високими концентраціями сірки та сірчаних сполук може викликати дерматити, екземи, а також інші хвороби шкіри [10]. Згідно з дослідженнями, в районах, де відбувається видобуток, рівень захворювань шкіри може бути на 30% вищим, ніж в інших регіонах. Окрім цього, ці речовини можуть спричиняти запалення слизових оболонок очей, носа та горла, що призводить до їхнього хронічного подразнення.

Однією з найсерйозніших загроз для здоров'я людей, пов'язаних із сірковидобувною діяльністю, є ризик розвитку онкологічних захворювань. Дослідження показують, що тривалий вплив токсичних речовин, таких як діоксид сірки, може підвищити ймовірність виникнення раку легень [11]. Токсичні речовини, що накопичуються в організмі, можуть спричиняти генетичні мутації, які призводять до виникнення злоякісних пухлин.

Негативний вплив сірковидобувної діяльності на здоров'я населення вимагає впровадження заходів для мінімізації токсичних викидів та постійного моніторингу стану здоров'я людей, які проживають у промислових зонах. Важливим є також підвищення обізнаності населення щодо потенційних ризиків та впровадження програм профілактики та лікування захворювань, пов'язаних із забрудненням довкілля.

1.2. Еколого-технічні аспекти рекультивації пошкоджених територій

Рекультивація земель після видобутку сірки є невід'ємним етапом відновлення територій, які зазнали значних порушень унаслідок видобувної діяльності. Вона охоплює цілу низку заходів, спрямованих на відновлення природного балансу, підвищення економічної ефективності та покращення умов для життя людей, які проживають у цих регіонах. Такий підхід дозволяє не лише

мінімізувати шкоду, завдану природі, але й сприяти поверненню земель до активного використання [7].

Робота сірко видобувних підприємств супроводжується деградацією ґрунту, порушенням водного режиму та втратою біорізноманіття. Завдяки рекультивації відбувається поступове повернення цих територій до природного стану, сприяючи відновленню рослинного і тваринного світу. Згідно з дослідженнями, в регіонах, де було проведено біологічну рекультивацію, спостерігалось збільшення видового різноманіття на 20-30% порівняно з нерекультивованими територіями [12]. Рекультивація також має значний вплив на покращення якості життя населення. Забруднення повітря, води та ґрунту, викликане видобутковою діяльністю, знижує якість довкілля, що негативно позначається на здоров'ї людей. За оцінками експертів, належна рекультивація може знизити рівень забруднення на 40-50%, що позитивно впливає на екологічну ситуацію і, відповідно, на здоров'я місцевих жителів [7,12]. У деяких регіонах було зафіксовано зменшення випадків респіраторних захворювань на 15-20% після проведення комплексних заходів із відновлення довкілля.

Процес рекультивації зазвичай проходить у кілька послідовних етапів. Перший включає комплексні дослідження властивостей ґрунту, рельєфу та кліматичних умов, що дозволяє глибше розуміти специфіку території та обирати найефективніші методи для її відновлення [13]. Наприклад, дослідження показують, що понад 70% випадків невдалих спроб рекультивації пов'язані з недостатньо проведеними дослідженнями на початковому етапі. Аналіз фізичних і хімічних характеристик ґрунту, таких як його структура, кислотність та вміст поживних речовин, допомагає виявити потребу у спеціальних заходах, наприклад, внесенні добрив або вапнуванні [14]. Вивчення рельєфу також грає важливу роль у виборі підходів до запобігання ерозії та інших негативних явищ, зокрема, на схилах або в зонах з високим рівнем поверхневого стоку води.

На основі цих досліджень створюють проєкт рекультивації, що включає детальний план відновлення території. Проєкт містить не лише технічні та

біологічні заходи, але й конкретні етапи виконання робіт, бюджет і терміни. Залучення місцевих громад та екологічних організацій до планування також є важливою частиною підготовчого етапу [1]. Статистика показує, що проекти рекультивації, в яких брали участь зацікавлені сторони, демонструють на 30% вищий рівень задоволеності громад та ефективності впровадження.

Наступний етап рекультивації - це реалізація конкретних фізичних заходів з відновлення території, що включає планування рельєфу, засипку кар'єрів та створення дренажних систем [1, 12]. Важливою частиною цього етапу є контроль за водними ресурсами та запобігання ерозії. Наприклад, у 60% випадків застосування дренажних систем дозволяє уникнути затоплення та покращити водний баланс території, що є критично важливим для подальшого відновлення рослинності.

Засипка кар'єрів і утворення терас на схилах не тільки забезпечують стабільність території, але й знижують ризик ерозії ґрунту [15]. Крім того, ці заходи дозволяють краще зберігати вологу в ґрунті, що сприяє розвитку рослин і зменшує необхідність у додаткових водних ресурсах. Збереження родючого шару ґрунту також є важливим аспектом технічного етапу, оскільки він містить поживні речовини, які потрібні для росту рослин. Дослідження показують, що у випадках, коли родючий шар був правильно збережений і використаний повторно, ефективність відновлення рослинного покриву збільшується на 50% [12, 15].

Завершальним є біологічний етап, який спрямований на відновлення природної рослинності та стимулювання біологічних процесів у ґрунті. Одним із головних методів на цьому етапі є залуження - висівання трав'янистих рослин, які укріплюють ґрунт і запобігають його подальшій ерозії. За даними досліджень, залуження може зменшити ерозійні процеси на 30-40%, що робить його ефективним інструментом у боротьбі з деградацією ґрунту. Лісовідновлення також є важливим заходом, який дозволяє повернути лісові екосистеми на

відновлені території. Висадка місцевих видів дерев допомагає збільшити біорізноманіття, що позитивно впливає на стійкість екосистеми [16].

Не менш важливим є внесення добрив та біологічних препаратів для відновлення родючості ґрунту. Застосування органічних добрив, таких як компост або перегній, може збільшити врожайність на 20-25%, що є важливим фактором для сільськогосподарських земель. Біологічні препарати, зокрема мікроорганізми, які сприяють засвоєнню рослинами поживних речовин та сірки, також відіграють важливу роль у відновленні ґрунтових екосистем. У дослідженнях зазначено, що використання таких препаратів підвищує стійкість рослин до стресових умов на 15-20% [16].

Рекультивація земель після видобутку сірки є комплексним завданням, що містить фізичні, хімічні, біологічні та технічні заходи. Використання комплексного підходу дає змогу збільшити ефективність відновлення земель на 50-60 %, що є важливим кроком у забезпеченні сталого розвитку регіонів, які зазнали техногенного впливу.

Проблеми рекультивації земель після видобутку сірки охоплюють кілька ключових аспектів, серед яких - висока вартість, тривалість процесу та недостатність наукових розробок. Кожен із цих викликів вимагає системного підходу та ретельного планування, щоб ефективно відновлювати порушені території та забезпечувати їх стале використання.

Рекультивація є тривалим і технічно складним процесом, що вимагає інвестицій не тільки в початкові заходи, а й у довгострокове управління відновленими територіями.

Фінансові витрати охоплюють:

- підготовчий етап, що включає детальні ґрунтові дослідження і розробку проекту, може коштувати до 15% загальних витрат на проект.
- технічний етап, зокрема будівництво дренажних систем, засипка кар'єрів і планування рельєфу, часто становить до 50% загальної

вартості проекту. Це пояснюється високою вартістю спеціалізованого обладнання, матеріалів та кваліфікованої праці.

- біологічний етап, який включає висадку рослин і внесення добрив, може складати до 30% загальних витрат, особливо на великих площах, де потрібні інтенсивні агротехнічні заходи [12].

Після завершення основних робіт виникає потреба в моніторингу та управлінні, що може додати ще 10-20% до загальних витрат на проект. Це включає регулярний контроль за станом ґрунтів, водних ресурсів і рослинності для оцінки ефективності рекультивації.

Проблеми фінансування полягають у тому, що видобувні компанії не завжди виділяють достатньо коштів на рекультивацію у своїх бізнес-планах. Урядові програми підтримки також можуть бути обмеженими, що ускладнює залучення додаткових інвестицій. В результаті деякі проекти можуть залишатися недофінансованими або затриманими, що негативно впливає на процес відновлення [17].

Рекультивація є довготривалим процесом, який може займати від 5 до 30 років, залежно від характеру пошкодження земель. Це зумовлено складністю екосистем і необхідністю адаптації рослин, ґрунтів та інших екологічних елементів до нових умов. Складність екосистем впливає на тривалість рекультиваційних заходів, оскільки відновлення природного біорізноманіття, стабілізація ґрунтів та відновлення водного балансу потребують часу. У деяких випадках, особливо на територіях із серйозною деградацією, відновлення природного балансу може тривати до 30 років [12, 18].

Крім того, часові рамки виконання заходів можуть подовжуватися через несприятливі погодні умови, брак ресурсів або проблеми з фінансуванням [17]. Наприклад, висадка рослин може бути відкладена через несприятливі кліматичні умови, що відтерміновує відновлення на 1-2 роки. Моніторинг та адаптація після завершення основних робіт також потребують часу. Моніторинг стану ґрунтів, води та рослинності дозволяє виявляти проблеми та коригувати заходи для

досягнення бажаних результатів. У випадку виявлення негативних змін може знадобитися корекція плану, що продовжить загальний термін відновлення.

Ще однією суттєвою проблемою є недостатність наукових розробок у сфері рекультивації земель. Для деяких типів порушених територій не існує достатньо ефективних методів і технологій, що ускладнює процес відновлення та підвищує ризик невдачі проектів [19].

Специфічні типи порушених земель, такі як території, забруднені важкими металами або хімічними відходами, потребують специфічних методів очищення, які не завжди відомі або протестовані. За оцінками, близько 30% забруднених територій в Україні залишаються без ефективних рішень для відновлення [19, 20].

Окрім цього, брак фінансування наукових досліджень є ще однією проблемою, яка уповільнює розвиток нових технологій. Інвестиції в дослідження і розробки часто є недостатніми через орієнтацію компаній на короткострокові прибутки. Без нових наукових рішень неможливо досягти ефективного і сталого відновлення земель [19, 20].

Адаптація до змін є важливим аспектом, який вимагає постійного оновлення методик. Зміна клімату, зміни у використанні земель та розвиток нових технологій потребують регулярного перегляду підходів до рекультивації. Відсутність інноваційних підходів ускладнює адаптацію до нових умов і може призвести до неефективних результатів.

Економічний аспект рекультивації також не можна ігнорувати. Відновлені землі можуть використовуватися для сільськогосподарських, лісгосподарських або рекреаційних потреб, відкриваючи нові можливості для розвитку економіки регіону [12, 20]. У результаті рекультивації понад 60% порушених земель у країнах ЄС було повернуто для сільськогосподарського використання. Це не лише сприяє економічному зростанню, а й дозволяє створювати нові робочі місця. За підрахунками, кожен гектар рекультивованої землі може забезпечити до 3-5 нових робочих місць у сферах сільського або лісового господарства [21].

Одним із прикладів успішної рекультивації техногенно пошкоджених територій є Польща, де на колишніх сірковидобувних територіях було впроваджено цілий комплекс заходів відновлення. Одним із основних кроків стало вапнування, яке допомогло зменшити кислотність ґрунтів на 40%. Це зниження дозволило покращити умови для відновлення рослинного покриву.

Далі, біологічні методи, такі як залуження та лісовідновлення, допомогли відновити рослинний покрив і зменшити ерозію ґрунтів. Висадка місцевих видів рослин збільшила біорізноманіття на 25%, що є ключовим показником екологічної стійкості. Завдяки цьому території, які раніше використовувалися для видобутку сірки, тепер слугують для сільськогосподарських і рекреаційних потреб. Врожайність на цих землях зросла на 30%, що додатково підтверджує екологічну ефективність таких заходів [22].

У Китаї рекультивація шахтних територій відзначилася застосуванням як традиційних, так і інноваційних технологій. Одним із важливих аспектів цього підходу було створення штучних водойм, які сприяли відновленню гідрологічного режиму. Це дозволило знизити ризик затоплення на 30% і покращити якість води, що забезпечило стає середовище для водної фауни.

Крім того, було використано наноматеріали для швидшого відновлення ґрунтів. Це дозволило збільшити родючість ґрунтів на 35%, що значно скоротило час рекультивації і зробило території придатними для сільськогосподарського використання [23].

Рурський регіон Німеччини є яскравим прикладом того, як індустріальні території можуть бути успішно перетворені на рекреаційні зони. У XX столітті регіон був центром важкої промисловості, але після закриття шахт та заводів було вирішено перетворити його на зелені території. Протягом понад 30 років в регіон було вкладено 16 мільярдів євро, що дозволило перетворити занедбані індустріальні зони на парки, озера та культурні центри [24]. Найбільш відомий приклад - це колишній вугільний завод Zollverein [25], який тепер є культурним центром і входить до списку об'єктів спадщини ЮНЕСКО. У результаті цих

заходів, якість повітря в регіоні покращилася на 50%, а рівень біорізноманіття зріс на 50%. Щорічно регіон відвідують понад 5 мільйонів туристів, що свідчить про його економічну і соціальну важливість.

Рекультивація техногенно пошкоджених територій є складним, але досяжним завданням, завдяки якому можна досягти успіху внаслідок поєднання інноваційних технологій та екологічно орієнтованих підходів. Досвід Польщі, Китаю та Німеччини показує, що навіть найскладніші проекти відновлення можуть значно покращити стан екосистем і забезпечити нові можливості для економічного розвитку.

Для проекту рекультивації у біосферному резерваті "Розточчя" ці приклади можуть слугувати орієнтиром у впровадженні інноваційних технологій і залученні місцевих громад до процесу відновлення. Завдяки комплексному підходу можна досягти екологічного та соціально-економічного успіху, подібного до того, як це було зроблено у зазначених країнах.

1.3. Відновлення життєдіяльності екосистеми

Основні екологічні проблеми, що виникають унаслідок видобутку сірки:

- забруднення ґрунтів, накопичення токсичних сполук (сульфідів, сірчаної кислоти), порушення структури ґрунту;
- деградація водних екосистем, як наслідок – потрапляння сірчаних сполук у поверхневі та підземні води, закислення водойм;
- пилове забруднення та підвищений рівень сірчаного пилу у повітрі, що впливає на рослинний і тваринний світ;
- руйнування ландшафтів а саме формування кар'єрів, териконів та відвалів, що змінюють природні екосистеми.

Ліквідація сірковидобувного підприємства є важливим першим кроком на шляху до відновлення пошкодженої екосистеми. Однак, сам процес ліквідації не завершує відновлення, а лише є першопочатковим в рекультивації, яка є довготривалим і комплексним завданням.

Надлишок сірки у ґрунтах і водних екосистемах може мати згубні екологічні та біогеохімічні наслідки, включаючи виснаження основних катіонів у ґрунті, підкислення поверхневих вод, токсичність сірководню та похідні [26].

Після завершення ліквідації необхідно провести низку заходів для реабілітації ґрунтів, відновлення рослинності та покращення гідрологічного режиму. Ці кроки є критично важливими для повноцінного відновлення життєдіяльності екосистеми, яка була порушена внаслідок видобутку сірки.

До процесу відновлення екосистеми належить:

- відновлення ґрунтів;
- відновлення біорізноманіття;
- очищення водних ресурсів;
- контроль забруднення повітря.

Що стосується повітря, то найвищі концентрації сірки спостерігаються не в районах, пов'язаних з видобутком навіть вугілля чи сірки, а у високоурбанізованих місцях, поблизу великих міських агломерацій.

Ґрунти становлять основу всіх наземних екосистем і, отже, підтримують їх біорізноманіття та екосистемні послуги [27], що робить їх життєво важливим компонентом будь-якої комплексної програми екологічного відновлення [28, 29].

Реабілітація ґрунтів є ключовим етапом, оскільки забруднені ґрунти не можуть підтримувати нормальний розвиток рослинності і зберігати стабільну екосистему. Першим кроком є оцінка стану ґрунтів, що може включати хімічний аналіз на вміст сульфатів, важких металів та інших забруднювачів. Згідно з даними досліджень, до 50 % ґрунтів на сірковидобувних територіях можуть містити високий рівень забруднення, що потребує значної корекції хімічного складу.

Перед початком рекультивації важливо провести ретельну просторову розвідку території та ефективно спланувати заходи. Крім того, слід також враховувати можливі труднощі та перешкоди, пов'язані з подальшим управлінням територією після завершення рекультивації. Надзвичайно

забруднені, засірчені зони є різноманітними екосистемами, і вплив сірки (навантаження, яке потрапляє в навколишнє середовище) важко передбачити, що робить такі екосистеми дуже цікавими, відкриваючи широкі можливості для дослідників. Встановлено, що присутність сірки сильно виснажує території, впливаючи на рослинність, ґрунтові та поверхневі води району забруднення. Слід зазначити, що ґрунт, зокрема його захист, має розглядатися як питання пріоритету, оскільки ґрунт, окрім своєї важливої ролі в екосистемі (середовище мікро- та макроорганізмів, багатьох поживних речовин тощо), є захисним фільтром від забруднення води та легкого вивільнення летких елементів у повітря. Таким чином, сильно змінені території повинні підлягати постійному моніторингу, навіть якщо відновлення даної території вважається завершеним [30].

Для поліпшення родючості ґрунтів застосовують такі методи, як внесення добрив, вапнування (підвищення рН ґрунту). Крім того, можуть використовуватися біологічні препарати, які підвищують біологічну активність ґрунту та покращують його здатність підтримувати рослинність. Моніторинг якості ґрунту протягом усього процесу рекультивації допомагає забезпечити успішність цих заходів.

Внесення добрив є одним з ефективних методів підвищення родючості ґрунту та мікробної активності. Порівняно з відсутністю внесення добрив, удобрення швидко покращило поживні речовини ґрунту та бактеріальне α -різноманіття, обидва з яких не показали істотних відмінностей між хімічними добривами та органічними добривами. Зі збільшенням часу рекультивації рівень поживних речовин у ґрунті (органічна речовина ґрунту, доступний азот, доступний фосфор, доступний калій) і бактеріальна різноманітність зросли. Водночас відносна чисельність *Proteobacteria*, *Actinobacteria* та *Bacteroidetes* зросла, а відносна чисельність *Acidobacteria*, *Chloroflexi* та *Nitrospirae* зменшилася. Порівняно з 1-річним і 3-річним меліорованим ґрунтом, поживні речовини ґрунту та структура бактеріального співтовариства в 7-річних

меліорованих ґрунтах були більш подібними до таких у непорушених ґрунтах. Підсумовуючи, час рекультивації є основною рушійною силою для відновлення властивостей ґрунту та бактеріальних спільнот у районах видобутку, а внесення добрив може скоротити час відновлення рекультивованого ґрунту [31, 32].

Основною причиною підкислення субстратів і ґрунтових розчинів є висока концентрація сірки. Високі концентрації сірки в ґрунті зазвичай пов'язані з підкисленням і низьким рН [33]. Застосування елементарної сірки (з нормою 300 мкмоль/кг) знижує рН ґрунту на 0,5 U [34]. Найбільш поширеною формою сірки в ґрунті є пірит. Кислі сульфатні ґрунти можуть утворюватися через вихідний матеріал, що містить пірит, пов'язаний із вугільними покладами, піддається впливу кисню та піддається окисленню піриту, що виділяє сильну кислоту та залишкові сульфати [35].

Досліджено вплив деревної (соснової) підстилки на фільтрат хімічного складу ґрунту та сірчані субстрати шахтних ґрунтів колишньої сірчаної шахти. Незважаючи на те, що рН субстрату підвищився впродовж 12 тижнів експерименту, він все ще перебував у діапазоні токсичних значень, і рН ґрунту було описано як основний фактор, що впливає на мікроорганізми ґрунту [36]. Очевидно, що вміст катіонів основ, які містилися в сосновій підстилці, було недостатнім для нейтралізації токсичної кислотності досліджуваних субстратів. Для пом'якшення негативних наслідків надмірної концентрації сірки в ґрунті, пов'язаної з виробництвом сірки, рекомендується вапно (вапняк, гашене вапно, негашене вапно). Вважається, що застосування CaCO_3 є найефективнішим способом покращення екологічних властивостей кислих ґрунтів, забруднених елементарною сіркою [37].

Отже, для посилення мікробіологічної активності ґрунтових субстратів потрібна додаткова нейтралізація токсичної кислотності.

Для реабілітації хвостосховищ з токсичними речовинами на колишній території гірничодобувної промисловості пропонується використовувати цеолітовмісні глини (Ередвіт і Діальбекуліт), що містять комплекс мінералів з

лужною реакцією середовища. Крім глин в субстрат вносять торф з високим вмістом гумінових речовин.

Вапняк є поширеною добавкою, що використовується для боротьби з кислотністю ґрунту та забрудненням металами [38].

Для обробки кислих сульфатних ґрунтів використовували мелений магнієвий вапняк, гашене вапно, рідке вапно та розплавлений фосфат магнію в зануреному та вологому стані протягом 3 місяців. Протягом усього періоду впливу аналізували зразки ґрунту та води для визначення рН. Впродовж дослідного періоду спостерігали підвищення рівня рН (для меленого магнієвого вапняку у водному середовищі до 5,00 і до 4,00 у ґрунтах і дещо нижчі показники для гашеного вапна). Рекомендовано вносити 6 т/га меленого магнієвого вапняку перед вегетаційним періодом для отримання максимального ефекту і покращення неродючості кислих сульфатних ґрунтів.

Наслідки вапнування ґрунтів можуть зберігатися протягом декількох десятиліть і найбільш помітні на лісовій підстилці, але ці наслідки досить помірні, і, ймовірно, значна кількість вапняку буде втрачена через ерозію [37, 38].

Фіторемедіація - перспективний підхід до рекультивації земель та відновлення біорізноманіття.

У технології відновлення ґрунтів використовуються види рослин і сільськогосподарські культури з максимальними біоіндикаційними можливостями. Відбір рослин здійснюється на основі порівняння сорбційних здібностей різних рослин на одних і тих же фазах розвитку, але в різних умовах середовища.

Акумулятивні рослини, такі як амарант, бобові та ін., покращують токсичні ґрунти. Результати дослідження показують, що можна знизити токсичність ґрунтів і значно відновити їх родючість.

Фіторемедіація за допомогою цих природних гіперакумуляторів все ще має деякі обмеження, оскільки це трудомісткий процес, який вимагає дуже багато

часу для очищення забрудненого ґрунту, особливо на помірно та сильно забруднених ділянках. Частково це може бути пов'язано з повільним темпом росту та низьким виробництвом біомаси цих гіперакумуляторів. Таким чином, покращення продуктивності рослин є критичним кроком для розробки високоефективної фіторе mediaції. Розвиток генної інженерії став потужним інструментом для модифікації рослин із бажаними властивостями, такими як швидкий ріст, висока біомаса, висока толерантність і накопичення забруднюючих речовин, а також хороша адаптація до різних кліматичних і геологічних умов. Отже, добре розуміння механізмів поглинання, транслокації та детоксикації елементів у рослинах, а також ідентифікація та характеристика різних молекул і сигнальних шляхів будуть мати велике значення для розробки ідеальних видів рослин для фіторе mediaції за допомогою генної інженерії [39, 40].

Відновлення природної рослинності - це критично важливий аспект відновлення екосистеми. Рослинність забезпечує не лише укріплення ґрунту і запобігає ерозії, але й сприяє формуванню нових біоценозів. У регіонах, де відбувся видобуток сірки, використання місцевих видів рослин може підвищити ймовірність успішного відновлення на 60%, оскільки вони краще адаптовані до місцевих кліматичних умов.

Цей процес включає залуження (висівання трав'янистих рослин) і висадку дерев та чагарників. Важливо також забезпечити достатньо часу для укорінення і розвитку рослин, що може зайняти кілька років залежно від умов регіону.

Хімічні параметри забрудненого ґрунту також впливають на рослинність - у районах із високим вмістом сірки або кислот трав'яниста рослинність, дерева та кущі є або дуже рідкісними, або зовсім відсутні. Такі поверхні (голі ґрунти) називають деградованими поверхнями [30].

Цікавою реакцією рослин на надмірну концентрацію сірки є стратегія блокування поглинання забруднюючих речовин із ґрунту (справжнє виключення або блокування елементів). Ця стратегія широко використовується в очереті,

який є стійким до стресових факторів навколишнього середовища і, відповідно, може бути використаний у рекультивації та рекультивації таких ґрунтів, які зазвичай демонструють підвищену солоність (або ЕС) і вміст сірки.

Ріст дерев у заліснених районах показує, що після ретельної нейтралізації кислотності нововведені трав'янисті рослини та дерева характеризуються відносно позитивними параметрами росту та життєздатністю. Значне зниження вмісту сірки в сильно забруднених середовищах в результаті промивання, безумовно, можливе, але це тривалий процес, якого неможливо досягти без нейтралізації ефекту детоксикації ґрунту.

Розглянуто можливість рекультивації фосфогіпсових відвалів з використанням посіву трав'янистих рослин родини Poaceae. На основі визначення параметрів росту, а також накопичення іонів сірки та фтору в рослинах. Встановлено доцільність покриття поверхні відвалів ґрунтопокривною сумішшю, що складається з піску та осаду стічних вод у кількості 10 % або 20 % за масою [41]. Таким чином заходами досягається і відновлення рослинності покращення стану ґрунтів.

Досліджено забруднення ґрунту сіркою та відновлення рослинності в околицях колишніх свердловин на лісовій ділянці після шахти Jeziórko (південна Польща, Тарнобжегський регіон). Несприятливі властивості ґрунту, виявлені на цих ділянках, спричинили значну затримку росту рослин або навіть загнивання лісу та продовжують перешкоджати ефективній сукцесії судинних рослин. Ці типи територій є прикладами локально неефективно завершеної рекультивації та, зокрема, нейтралізації. Заліснення сосною та березою в несприятливих умовах, що склалися на колишніх сіркодобувних ділянках, було успішним у тих місцях, де були правильно сплановані та проведені рекультиваційні роботи, зокрема нейтралізація флотаційним вапном у кількості 300 мг/га [42].

Також на рекультивованих територіях колишньої сірчаної шахти Jeziórko здійснено оцінку рослинності, надходження поживних речовин і особливо накопичення сірки в листі дерев (берези та сосни), що використовуються для

лісовідновлення, а також очерету малого (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth), що з'являється в сукцесії. Дерева добре росли на ділянках, де нейтралізація та рекультивація були проведені належним чином, і показали хороший запас поживних речовин (за винятком фосфору та азоту), тоді як на ділянці з залишковими забрудненнями була відмічена лише трав'яниста рослинність з низьким рівнем покриття, в якій домінував очерет. Між вмістом поживних речовин у ґрунті та деревах спостерігалися лінійні кореляції, тоді як між ґрунтом та очеретом не було виявлено жодної кореляції. Очерет лісовий не показав підвищеного поглинання сірки, що може свідчити про стратегію блокування поглинання забруднювача з ґрунту і може бути рекомендований як вид, стійкий до сірчистих ґрунтів [43].

Як приклад заліснення деревом дуба після рекультивації кисло-сірчаних шахтних ґрунтів можна розглядати Лужицький гірничий округ (Німеччина). Спочатку була здійснена рекультивація шляхом внесення багатої на Ca і Mg золи електростанцій або вапняку. Таким чином було успішно заліснено приблизно 60% ґрунтів кислих шахт. Однак, щодо високого потенціалу підкислення та інтенсивного мінерального вивітрювання, все ще невідомо, чи були створені самостійні лісові екосистеми, чи таке відновлення не вдасться в довгостроковій перспективі [44].

Гідрологічний режим значно впливає на стан екосистеми, тому його відновлення є невід'ємною частиною процесу рекультивації. Використання біоінженерних методів, таких як біофільтри та висадка водної рослинності, є ефективними підходами для відновлення водойм, забруднених сіркою. Ці методи базуються на природних процесах очищення води та відновлення екосистем.

Біофільтри використовують мікроорганізми для розщеплення забруднювачів у воді. Вони можуть бути застосовані для очищення стічних вод, зокрема від сірковмісних сполук. Дослідження показали, що використання природних та абсорбційних субстанцій, включаючи біологічні агенти (мікроорганізми, рослини та риби), є ефективним у системах водоочищення [45].

Водні рослини, такі як очерет або рогіз, здатні абсорбувати та акумулювати забруднювачі, включаючи сірковмісні сполуки. Використання фітотехнологій для очищення водних екосистем має переваги над традиційними методами, оскільки вони є екологічно безпечними та економічно вигідними [46].

При створенні дренажних систем має місце розвиток кислотолілюбних хемолітотрофних бактерій, які можуть мікробіологічно закисляти водойми. Як варіант вирішення проблеми запропоновано створити сприятливе середовище для конкуруючих мікроорганізмів, щоб послабити біологічно індуковане кисле виснаження шляхом послідовної обробки води NaOH, а потім суміші лактату і соєвої формули [47]. Ця послідовна обробка сприяла найбільшому підвищенню рН, лужності, вмісту сульфідів, мулоутворюючих і сірковідновлюючих бактерій у водах порівняно з іншими методами обробки і контрольними зразками.

Комбінування біофільтрів та висадки водної рослинності може підвищити ефективність очищення водойм. Такий підхід дозволяє одночасно знижувати концентрацію забруднювачів та відновлювати природні функції екосистеми.

Створення дренажних систем допомагає керувати водними потоками та запобігати підтопленням, що може знижувати ефективність інших рекультиваційних заходів. За оцінками, контроль рівня підземних вод і управління стоком води можуть знизити ризик ерозії ґрунтів на 30-40%.

Хімічна нейтралізація закислених сірчаних вод є важливим процесом для відновлення екологічної рівноваги у водних екосистемах. Основними реагентами для нейтралізації кислотності є вапно (CaO) та доломітове борошно ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Вапно є ефективним нейтралізатором кислотності, оскільки швидко реагує з кислими компонентами води, підвищуючи рН до нейтральних значень. Це сприяє осадженню важких металів у вигляді нерозчинних гідроксидів, що полегшує їх видалення з води. Доломітове борошно діє як буфер, поступово нейтралізуючи кислотність і забезпечуючи стабільне підвищення рН. Крім того, воно збагачує воду іонами кальцію та магнію, які є важливими для біологічних процесів у

водних екосистемах. Вибір між вапном та доломітовим борошном залежить від конкретних умов: швидкості реакції, оскільки вапно забезпечує швидке підвищення рН, тоді як доломітове борошно діє повільніше; тривалості ефекту, відомо, що доломітове борошно забезпечує більш тривалий буферний ефект; вартості та доступності реагенту.

При застосуванні хімічної нейтралізації важливо враховувати дозування реагентів, особливості водного об'єкта та потенційний вплив на місцеву біоту. Комплексний підхід, що включає моніторинг та оцінку ефективності, є ключовим для успішної нейтралізації закислених вод [48].

Видобуток сірки на території призводить до появи окремих гарячих точок із дуже високою концентрацією сірки в ґрунті (до 45 000 мг/кг), низьким рН (<2,0) і рівнем електропровідності (ЕС) до 2080 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ці властивості впливають на водні екосистеми, які характеризуються дуже високим вмістом сульфатів (природні сірчані руди геологічного походження) та іонів кальцію (в результаті використання післяфлотаційного вапна/шламового вапна в процесі рекультивації). Незважаючи на високі концентрації сульфат-іонів, спостерігалася кисла реакція (рН нижче 5) у водах, можливо, через згаданий вище вапняний мул [30, 48].

Дослідження параметрів поверхневих вод на рекультивованих і заліснених територіях колишньої сірчаної шахти свідчать про їх загальну низьку сезонну та просторову мінливість. Однак було виявлено наявність гарячих точок (у трьох з 15 точок моніторингу), які, як правило, мали дуже низький рН (нижче 4,0), високу електропровідність (вище 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) і вміст сірки (вище 400 мг/л), або високу частку іонів кальцію, що пов'язано з нейтралізацією сірчистих ґрунтів. Висока концентрація сірки в ґрунтах корелювала не з підкисленням, а скоріше з підлужуванням (гарячі точки). Це явище було пов'язане зі специфікою рекультивації, де використовувалося постфлотаційне вапно [49]. Дослідження свідчать про необхідність точкового контролю за показниками забруднення води, які перебувають у прямій кореляції з якісним відновленням ґрунтів.

Стандартний підхід до відновлення підземних вод, забруднених сульфатами, - відкачування і очищення - є відносно дорогим і трудомістким. Запропоновано два інноваційних методи відновлення забруднених сульфатами підземних вод, використання нуль-валентного заліза (ZVI) і додавання електронодонорних субстратів [50]. Інноваційні методи відновлення включають використання субстратів з нульовим вмістом заліза або електронодонорних субстратів для сприяння відновленню сульфатів на місці, насамперед за допомогою мікробіологічних процесів.

Реставрація природних водойм і контроль за їх якістю, а також запровадження штучних водних об'єктів, допоможуть не тільки підтримувати розвиток рослинності, але й сприяти поверненню тварин, що є важливою частиною екосистеми.

Досягнення результату зі зменшення вмісту сірки в ґрунтах вимагає партнерства між дослідниками, сільськогосподарськими консультантами, фермерами та регуляторними органами, а також включення показника визначення сірки у програми моніторингу ґрунту та води. Це також потребуватиме інвестицій у дослідження в країнах з дефіцитом даних. Можна розробити і застосувати схеми управління на місцевому, регіональному та національному рівнях, а також розробити інтегровані плани управління. Жодне рішення окреме рішення не буде ефективним з огляду на широкий спектр впливу сірки на екосистему; скоріше, необхідним є поєднання інструментів управління. Хоча необхідні додаткові дослідження, щоб зрозуміти механізм перенесення і трансформації сірки в ландшафтах і в прилеглих водних середовищах [51].

Дослідження оцінювало довготерміновий вплив антропогенного тиску сірчаної промисловості на дернові ґрунти, розташовані поблизу сірчаної шахти Grzybów. У дослідженні передбачається, що 20 років, що минули з моменту закінчення експлуатації сірки, є достатньо тривалим періодом для того, щоб вміст сполук сірки в ґрунтах не перевищував допустимий рівень і ґрунти регіону можна класифікувати як незабруднені [52].

Контроль забруднення повітря є безпечним методом для досягнення сталого стану навколишнього середовища, і його можна досягти шляхом належного моніторингу забруднюючих речовин, які становлять значну небезпеку для навколишнього середовища [53]. Забруднення повітря можна контролювати або вимірювати за допомогою біомоніторингу, вмісту його в рослинах, які ростуть на досліджуваній території [30], моніторинг стану повітря в реальному часі з залученням ІТ-механізмів [54].

Дослідженнями встановлено, що найбільший вплив на зменшення концентрації SO_2 мали параметри тиску, кількості зелених насаджень, споживання палива, температура, швидкість вітру та вологість відповідно. Оскільки параметри споживання палива внаслідок антропогенної діяльності, а також площа зелених насаджень змінюються під впливом різних політик і людських рішень, концентрацію забруднювача SO_2 можна контролювати, зменшуючи споживання сірковмісних палив та збільшуючи площу зелених насаджень [55]. Оскільки на рекультивованих територіях викиди згорання палива мінімізовані, залишається основний чинник – площа зелених насаджень. Отже моніторинг і очищення забрудненого повітря – складне питання, яке охоплює екологічний, соціальний, економічний і політичний аспекти. Спостерігається пряма кореляція впливу викидів діоксиду сірки та скидів шахтних стоків на якість повітря та води на досліджуваних територіях [30, 56].

Отже, вживши заходів з рекультивації та відновлення ґрунтів, рослинності, покращення стану забруднених водойм можна досягнути зниження вмісту діоксиду сірки в повітрі.

Відновлення екосистеми має важливе значення не лише з екологічної, але й з соціально-економічної точки зору. Здорові екосистеми забезпечують чисте повітря, воду та природні ресурси, що сприяє поліпшенню якості життя місцевих громад. За даними досліджень, у регіонах, де успішно проведена рекультивація, якість життя населення може покращитися на 20-30%, що включає розвиток аграрного сектору, екологічного туризму та нові можливості для рекреації.

Моніторинг екологічного стану є важливим етапом для оцінки ефективності рекультиваційних заходів. Регулярний контроль за якістю ґрунту, води та біорізноманіття дозволяє виявляти проблеми і коригувати план дій у разі потреби. За оцінками, належний моніторинг може підвищити ефективність рекультивації на 20-25%.

Ліквідація сірко видобувного підприємства - це лише перший крок на шляху до повноцінного відновлення екосистеми. Успішна рекультивація потребує комплексного підходу, що включає технічні, біологічні та екологічні заходи. Важливою частиною є залучення науковців, громади та державних установ для забезпечення стійкості процесу відновлення і підвищення ефективності рекультиваційних заходів.

Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що сірковидобувні підприємства мали значний негативний вплив на навколишнє середовище. Основними проблемами було забруднення повітря сірководнем та діоксидом сірки, що спричиняє розвиток респіраторних захворювань у людей та сприяє утворенню кислотних дощів. Забруднення водних ресурсів відбувається через скидання стічних вод із високим вмістом сірчаної кислоти та сульфатів, що призводить до закислення водних екосистем. Деградація ґрунтів, пов'язана з накопиченням сірки та сульфатів, знижує їхню родючість і створює загрозу для сільського господарства. Негативні наслідки діяльності таких підприємств залишилися і після зупинки виробництва - зруйновані території кар'єрів і накопичувачів відходів (хвостосховищ).

Дієвим методом вирішення проблеми порушених територій є їх повна рекультивація із відновленням природних екосистем.

Рекультивація земель після сірковидобувної діяльності є складним та багатоступеневим процесом, що включає оцінку стану території, розробку

проекту відновлення, виконання технічних та біологічних заходів. Використання біотехнологій, таких як фіторемедіація, дозволяє ефективно відновлювати забруднені ґрунти. Досвід зарубіжних країн демонструє, що успішна рекультивація потребує комплексного підходу, застосування сучасних методів та моніторингу екологічного стану.

Відновлення біорізноманіття є ключовим етапом рекультивації. Використання місцевих видів рослин та дерев сприяє прискоренню процесу екологічного відновлення.

Рекультивація порушених територій позитивно впливає на соціально-економічний розвиток регіонів. Відновлені землі можуть бути використані для сільського господарства, рекреаційних зон або промислових потреб. Це сприяє створенню нових робочих місць, покращенню якості життя місцевого населення та розвитку екологічного туризму.

Таким чином, рекультивація земель є комплексним і багатогранним процесом, який вирішує екологічні, соціальні та економічні завдання. Її успішне проведення дає змогу не лише відновити порушені екосистеми, а й створити сприятливі умови для розвитку регіонів, покращити якість життя населення та зменшити негативний вплив на довкілля.

Для забезпечення ефективного відновлення територій в межах біосферного резервату «Розточчя», що зазнали руйнівного впливу під час функціонування Яворівського ДГХП «Сірка», актуальними є подальші дослідження щодо рекультивації пошкоджених територій, відновлення їх екосистемних функцій та біорізноманіття.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ. МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальна характеристика об'єкту та предмету дослідження

Об'єктом досліджень дисертаційної роботи є хвостосховище виробництва сірки флотаційним методом на Яворівському ДГХП «Сірка», яке знаходиться на території біосферного резервату «Розточчя». Дослідження впливу промислової діяльності цього підприємства на екосистеми показало, що тривала експлуатація сірчаних родовищ спричинила значні екологічні зміни. Основними наслідками стали деградація ґрунтів, забруднення водних ресурсів, фрагментація лісових масивів та скорочення біорізноманіття. Масштабне виробництво сірки флотаційним методом призвело до накопичення значних обсягів відходів у хвостосховищах, що становлять серйозну екологічну загрозу і після ліквідації сірковидобувного підприємства. За результатами опрацювання наукової літератури встановлено, що одним із ефективних методів рішення проблеми негативного впливу на довкілля є рекультивація пошкоджених територій та відновлення природних екосистем. Рекультивація порушених територій позитивно впливає на соціально-економічний розвиток регіонів. Відновлені землі можуть бути використані для сільського господарства, рекреаційних зон або промислових потреб. Це сприяє створенню нових робочих місць, покращенню якості життя місцевого населення та розвитку екологічного туризму.

Тому предметом досліджень є технологічні та екологічні аспекти рекультивації техногенно пошкоджених територій хвостосховища виробництва сірки флотаційним методом на Яворівському ДГХП «Сірка».

Рекультивація земель після сірковидобувної діяльності є складним та багатоступеневим процесом, що включає оцінку стану території, розробку проекту відновлення, виконання технічних та біологічних заходів.

Використання біотехнологій, таких як фіторе mediaція, дозволяє ефективно відновлювати забруднені ґрунти. Досвід зарубіжних країн демонструє, що успішна рекультивація потребує комплексного підходу, застосування сучасних методів та моніторингу екологічного стану. Логічна послідовність та хід виконання теоретичних та експериментальних досліджень приведені на рис. 2.1.

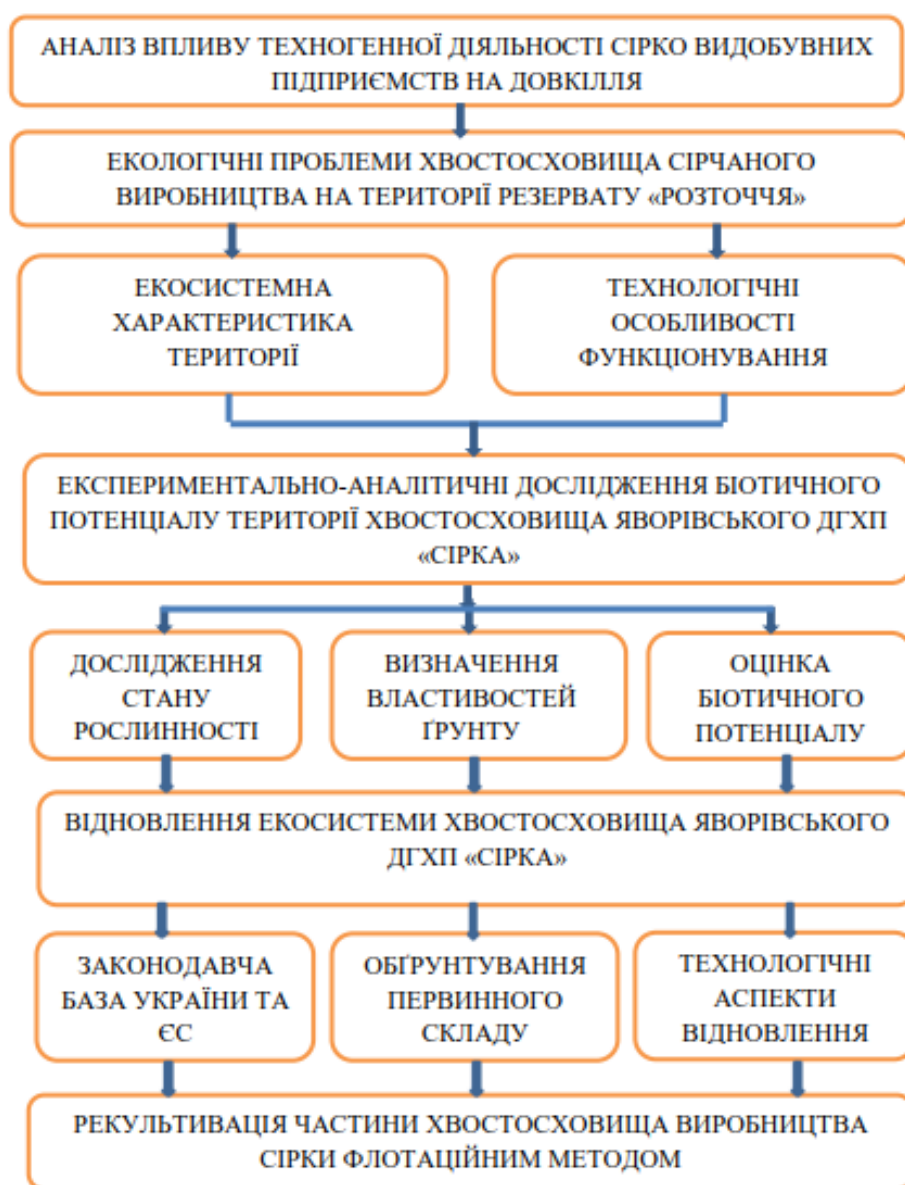


Рисунок 2.1 – Структурно – логістична схема проведення наукових досліджень.

2.2. Характеристика речовин, які використовувалися у дослідженнях

2.2.1. Нітроамофоска

Нітроамофоска - це комплексне мінеральне добриво, яке містить три основні елементи живлення: азот (N), фосфор (P) та калій (K). Вона широко використовується для підживлення рослин, забезпечуючи їх необхідними поживними елементами для росту і розвитку. Це добриво особливо ефективне при рекультивації порушених ґрунтів, оскільки воно дозволяє швидко відновити родючість ґрунтів, що зазнали деградації через інтенсивне використання або забруднення. Азот сприяє стимулюванню росту рослин і їх здатності до утворення хлорофілу, що важливо для відновлення зелених насаджень на порушених землях. Фосфор є необхідним для розвитку кореневої системи, що дозволяє рослинам краще закріплюватися в ґрунті, забезпечуючи стабільне харчування і водопостачання. Калій підвищує стійкість рослин до стресових умов, таких як посуха або забруднення, і зміцнює клітинні стінки, що знижує ймовірність розвитку хвороб.

Нітроамофоска також покращує структуру ґрунту, підвищуючи його аерацію, водоутримуючу здатність і здатність до самоочищення, що є важливим для відновлення екосистем після антропогенної діяльності. Проте при надмірному використанні цього добрива можливо засолення ґрунтів, що може погіршити його структуру і вплинути на здатність рослин засвоювати воду. Крім того, нітроамофоска не містить мікроелементів, таких як магній, кальцій та сірка, які також можуть бути необхідними для здорового розвитку рослин. Використання нітроамофоски в рекультивації ґрунтів допомагає швидко відновити баланс основних макроелементів і створити сприятливі умови для росту рослин, що робить її важливим інструментом для відновлення родючості порушених земель [57].

2.2.2. Агроболік універсал

Агроболік універсал - це біологічне добриво, яке містить живі корисні мікроорганізми, що активно впливають на покращення властивостей ґрунтів і стимулюють ріст рослин. Завдяки використанню корисних бактерій, препарат стимулює біологічну активність у ґрунті, підвищує його родючість, покращує структуру ґрунту та забезпечує рослини необхідними поживними елементами, такими як азот, фосфор і калій. Препарат особливо ефективний для використання на порушених, деградованих і бідних ґрунтах, що є важливим аспектом у процесах рекультивації земель.

Агроболік універсал сприяє поліпшенню фізико-хімічних властивостей ґрунтів, зокрема підвищує їх аерацію, водоутримуючу здатність та забезпечує оптимальні умови для розвитку кореневої системи рослин. Завдяки цьому покращується поглинання рослинами води та поживних речовин, що позитивно впливає на їх ріст, врожайність і стійкість до стресових умов, таких як посуха, температурні коливання або забруднення ґрунтів.

Один із ключових аспектів використання у рекультивації ґрунтів — це покращення біологічної активності ґрунту. Мікроорганізми, що входять до складу препарату, активно взаємодіють з кореневою системою рослин і стимулюють біохімічні процеси, що сприяють формуванню здорового ґрунтового середовища. Це також допомагає знижувати рівень забруднення ґрунтів та полегшує відновлення екосистем на постіндустріальних або деградованих територіях.

Агроболік універсал є екологічно безпечним продуктом, що не містить хімічних компонентів, і його використання не шкодить навколишньому середовищу. Препарат не тільки забезпечує зниження потреби в хімічних добривах і пестицидах, а й сприяє сталому розвитку аграрних систем, що робить його ефективним інструментом для сучасного землеробства, орієнтованого на екологічність і сталий розвиток.

Використання добрива агроболік універсал особливо актуальне при рекультивації порушених ґрунтів після інтенсивної господарської діяльності, що дозволяє швидше відновити родючість ґрунтів, підвищити їх біологічну активність і створити умови для успішного росту та розвитку рослин [57].

2.2.3. Міковітал

Міковітал - це біологічний препарат, що містить мікоризні гриби (*Glomus sp.*), які утворюють симбіотичні відносини з кореневою системою рослин. Цей препарат активно використовується для рекультивації порушених ґрунтів, оскільки він сприяє поліпшенню фізико-хімічних властивостей ґрунтів, зокрема покращенню їх структури та водоутримуючих властивостей. Мікоризні гриби допомагають рослинам краще поглинати воду та поживні елементи, що є особливо важливим на деградованих землях. Вони сприяють утворенню ґрунтових агрегатів, що покращує аерацію та знижує ерозію ґрунтів.

Препарат також підвищує стійкість рослин до стресів, таких як посуха, забруднення навколишнього середовища або зміни температури. Мікориза забезпечує рослини захистом від патогенних мікроорганізмів, оскільки гриби конкурують за ресурси з ґрунтовими шкідниками і можуть виробляти антисептичні речовини, що знижують ризик розвитку хвороб. Крім того, "Міковітал" є екологічно безпечним, оскільки не містить хімічних компонентів і сприяє сталому розвитку землеробства, зменшуючи потребу в хімічних добривах і пестицидах. Використання цього препарату допомагає створювати здорові екосистеми на рекультивованих землях, покращуючи родючість ґрунтів і сприяючи відновленню біорізноманіття [58].

2.2.4. Щучник дернистий (*Deschampsia caespitosa*)

Щучник дернистий (*Deschampsia caespitosa*) є багаторічною злаковою рослиною родини Poaceae, що характеризується утворенням щільних дернин

та високою адаптивною здатністю до екстремальних умов середовища. Вид проявляє толерантність до підвищеної вологості, кислотності ґрунту, низької родючості та ущільненості, що робить його перспективним об'єктом для фіторекультивациі деградованих і техногенно порушених земель.

Щучник дернистий природно поширений у помірному поясі Північної півкулі, зростає переважно на вологих луках, осушених болотах, у заплавах річок, а також у субальпійських та альпійських екосистемах. Він характеризується глибокою кореневою системою, яка ефективно закріплює верхній шар ґрунту, перешкоджаючи водній та вітровій ерозії. Куртинний тип росту сприяє формуванню стабільної рослинної структури на нестабільних субстратах.

У процесі рекультивациі щучник дернистий виконує важливу екологічну функцію: покращує фізичні властивості ґрунту, сприяє накопиченню органічної речовини та активизації ґрунтової мікробіоти. Рослина добре реагує на гідротехнічні та агротехнічні заходи, зокрема на внесення органічних добрив, мульчування та поверхневе вапнування, що дозволяє успішно інтегрувати її в програми фіто меліорації [59].

2.2.5. Костриця червона (*Festuca rubra*)

Костриця червона (*Festuca rubra*) — багаторічна злакова рослина родини Poaceae, що відзначається високою адаптивністю до різноманітних кліматичних та ґрунтових умов, а також здатністю формувати щільний дерновий покрив. Завдяки своїм агроекологічним властивостям вона є одним з ключових видів для фіторекультивациі, стабілізації ґрунту та ландшафтного відновлення порушених територій.

Костриця червона поширена в природному середовищі майже по всій території Євразії та Північної Америки. Вона добре росте на піщаних, супіщаних, кам'янистих і бідних за поживними речовинами ґрунтах, у тому числі на слабокислих і лужних субстратах. Вид проявляє високу

толерантність до посухи, заморозків, періодичного затоплення та механічного ущільнення, що робить його незамінним при рекультивації техногенних ландшафтів - від териконів до порушених пасовищ.

Форма росту - щільна дернина з розвиненою кореневою системою, що утворює поверхневу мату, яка ефективно закріплює верхній шар ґрунту, зменшуючи ерозійні процеси. Рослина також сприяє покращенню структури ґрунту та збільшенню вмісту органічної речовини через відмерлі рештки, що накопичуються в дерновому шарі. Завдяки алелопатичним властивостям, костриця може пригнічувати проростання небажаної рослинності, що також є перевагою у рекультиваційних посівах.

У ландшафтно-рекультиваційній практиці застосовується як у монокультурних, так і в змішаних посівах з іншими злаками та бобовими. Вона добре переносить часте скошування, тому підходить для стабілізації ґрунтів на узбіччях доріг, схилах кар'єрів, хвостосховищах, дамбах і міських територіях [59].

2.2.6. Мітлиця тонка (*Agrostis tenuis*)

Мітлиця тонка (*Agrostis tenuis*) багаторічна низькоросла злакова рослина родини Poaceae, яка характеризується делікатною морфологією, високою екологічною пластичністю та широким спектром застосування у ґрунтозахисних та рекультиваційних заходах.

Рослина природно поширена в помірному кліматичному поясі Європи, Азії та Північної Америки. Зустрічається на луках, схилах, вирубках, узбіччях, гірських пасовищах та торфовищах. Найкраще росте на кислих, піщаних і торф'янистих ґрунтах з помірною вологістю, однак завдяки своїй невибагливості також адаптується до бідних, ущільнених або техногенно порушених субстратів.

Мітлиця тонка (*Agrostis tenuis*) утворює щільний низький дерновий покрив із поверхневою кореневою системою, що ефективно утримує ґрунт на

схилах і протидіє ерозійним процесам. Унаслідок цього рослина часто використовується для гідротехнічної меліорації, закріплення дамб, відвалів, шламонакопичувачів і транспортних насипів. Завдяки своїй швидкій схожості та невибагливості до умов проростання, мітлиця тонка ідеально підходить для початкових етапів рекультивації територій, зокрема у вигляді фітошлейфів або посівів у суміші з іншими дернинними злаками.

Додатковою перевагою є її здатність до природного самосіву та конкурентоспроможність проти бур'янів, що сприяє довготривалому формуванню травостою без необхідності регулярного догляду. Вона також може відігравати позитивну роль у фітосукцесії, закладаючи основу для подальшого збагачення рослинного покриву [59].

2.2.7. Обліпіха крушиновидна (*Hippophae rhamnoides*)

Обліпіха крушиновидна (*Hippophae rhamnoides*) - це листопадний колючий кущ родини Elaeagnaceae, який активно використовується у фітомеліорації, рекультивації та ландшафтній стабілізації деградованих територій завдяки своїм потужним ґрунтозахисним, азотфіксуючим і фітореставраційним властивостям.

Обліпіха природно поширена в Євразії, переважно в зонах з помірним і різко континентальним кліматом. Вона характеризується високою толерантністю до бідних, піщаних, супіщаних, засолених, посушливих і еродованих ґрунтів, що робить її ідеальним видом для рекультивації порушених земель: кар'єрів, піщаних дюн, відвалів, берегів водосховищ та техногенних схилів.

Однією з ключових переваг є її симбіоз з азотфіксуючими актиноміцетами роду *Frankia*, завдяки чому рослина збагачує ґрунт біологічно доступним азотом, сприяючи формуванню ґрунтової родючості та розвитку супутньої рослинності. Добре розгалужена коренева система з

потужною сисною здатністю дозволяє обліписі ефективно закріплювати нестабільні субстрати, стримувати ерозію та акумулювати вологу.

Окрім екологічних функцій, обліпиха має значну господарську цінність: плоди містять вітаміни, антиоксиданти й використовуються у фармацевтичній, харчовій та косметичній промисловості. Її введення у фіторекультиваційні схеми дозволяє поєднувати відновлення природного середовища з потенційною економічною вигодою.

Обліпиха легко розмножується насінням, живцями та кореневими нащадками, добре переносить обрізку, посуху, низькі температури та антропогенне навантаження, що забезпечує її високу ефективність у довгострокових проектах рекультивації [60].

2.2.8. Береза повисла (*Betula pendula*)

Береза повисла (*Betula pendula*) - світлолюбне листопадне дерево родини Betulaceae, яке вирізняється високою екологічною пластичністю та значним потенціалом у фіторекультивації порушених, деградованих і техногенних земель. Успішно використовується як інтродуцент і автохтонний вид у процесах біологічної рекультивації в умовах помірного клімату.

Береза повисла природно поширена на більшій частині Європи та північної Азії. Вона добре приживається на піщаних, кам'янистих, торф'яних та кислих ґрунтах із низьким вмістом гумусу. Особливо ефективна на свіжо-порушених субстратах, де інші деревні види не витримують умов. Швидко заселяє пустки, терикони, вирубки, зсувні ділянки, сміттєзвалища, зруйновані узбіччя, ділянки після пожеж і гірничих розробок.

Береза повисла (*Betula pendula*) є типовим видом-піонером: її насіння проростає навіть на мінімальному шарі субстрату, а завдяки високій життєздатності та здатності до самосіву, вона швидко формує молоді деревостани. Коренева система добре розвинена, частково поверхнева, що

сприяє стабілізації ґрунтів і запобіганню ерозії. Водночас рослина сприяє гумусоутворенню, накопиченню листового опаду та активізації мікробіоти в кореневій зоні.

Завдяки високій здатності до фітосукцесії та природного розширення ареалу, Береза повисла (*Betula pendula*) широко застосовується у створенні фітоценозів на ранніх етапах рекультивації. Також береза може бути компонентом змішаних насаджень разом з вільхою, сосною, обліпихою та іншими деревно-чагарниковими видами для формування екологічно стабільних фітоугруповань [60].

2.2.9. Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*)

Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) - це одне з найважливіших хвойних дерев, що широко розповсюджене в Європі та Азії, зокрема в помірних зонах. Завдяки своїй висхідній кореневій системі та відносній невибагливості, сосна звичайна є одним із основних видів для лісовідновлення, а також для рекультивації деградованих і техногенних територій, таких як кар'єри, терикони, шламонакопичувачі, гірничі відвали та зсуви.

Сосна звичайна відзначається високою стійкістю до низьких температур, посухи та бідних ґрунтів. Вона може зростати на кислих, піщаних, супіщаних, бідних на поживні елементи ґрунтах, що робить її незамінним видом для рекультивації порушених земель. Завдяки своїй здатності утворювати щільну кореневу систему та активно запобігати ерозії, сосна допомагає стабілізувати ґрунт та попереджати його розмивання.

Одним з головних факторів, що забезпечує її успіх у рекультивації, є здатність до самозапилення та швидке проростання насіння. Вона добре приживається на рано порушених територіях, а її відносно легке розмноження насінням дозволяє формувати нові лісові насадження з мінімальними затратами на посадковий матеріал. Крім того, сосна має велике

значення для покращення структури ґрунтів, оскільки її коренева система сприяє аерації та покращенню водно-іригаційних властивостей ґрунтів.

Також, сосна звичайна активно взаємодіє з різними мікроорганізмами, що допомагає покращити родючість ґрунтів. Її відносна невибагливість дозволяє застосовувати її в якості домінуючого виду на важких та бідних субстратах [60].

2.3. Методика проведення експериментальних досліджень

2.3.1. Методика відбору проб ґрунту

Методика відбору проб ґрунту залежить від мети аналізу та фізичних характеристик ґрунту. Використання стандартизованих підходів дозволяє отримати точні та достовірні результати.

Відбір проб ґрунту проводили згідно правил, регламентованих відповідними нормативними документами [61].

Основні принципи відбору проб ґрунту: проби мають бути репрезентативними для всієї досліджуваної ділянки; відбір здійснюється за стандартними методиками, щоб забезпечити порівнянність результатів; ґрунт повинен бути сухим або зволженим до природного стану (уникати надмірної вологості). Відбір проводять на однаковій глибині в різних точках ділянки [62].

Методики відбору проб за рівнем глибини ґрунту поділяють на: поверхневий відбір (0 – 10 см) – для аналізу органічних речовин, рН, забруднення; орний шар (0 – 30 см) – використовується в агрономічних дослідженнях; глибокий відбір (до 1 м і більше) – для геохімічних і екологічних досліджень. Відрізняються також методики за типом знаряддя для відбору зразків. Шпательний метод використовується для відбору поверхневих проб. Буровий метод – при відборі проб з глибини. Користуються ґрунтовим буром, ручним шнековим буром, що є ефективним для відбору проб у твердих

грунтах та пробовідбірниками-глибиномірами для болотистих ґрунтів та під водою.

При відборі проб для аналізу важких металів слід уникати використання металевих інструментів, використовувати пластикові або тefлонові пробовідбірники. Проби для мікробіологічних досліджень відбирають стерильним інструментом та зберігають на холоді. З проб для визначення гранулометричного складу слід виключати великі фрагменти та кореневі залишки [63].

Для отримання фізико-хімічної характеристики ґрунтів та ґрунтоутворюючих порід, а також для уточнення польової діагностики, здійснюють відбір індивідуальних зразків ґрунту. Змішані зразки представляють собою проби орного або підорного шару. Середню пробу формують із суміші зразків відповідного горизонту або його частини, взятих у шести-восьми прикопках, розташованих на відстані 10 – 15 м від основного розрізу. У разі відсутності основного розрізу прикопки розміщують по колу. Змішані зразки застосовують для аналізу динаміки поживних речовин.

Окремі зразки відбирають із середини кожного генетичного горизонту у найбільш характерних розрізах або з горизонтів, що мають особливе наукове значення (товщина шару приблизно 10 см). У зразок не повинні потрапляти сторонні новоутворення, нетипові для даного горизонту. Відбір здійснюють за допомогою шпателью, бура, лопати або ножа, рухаючись знизу вгору, щоб уникнути засипання нижньої частини розрізу та забруднення стінок матеріалом з верхніх горизонтів.

Відбір проб у польових умовах здійснюють за допомогою приладу Литвинова. На свіжо очищену горизонтальну поверхню ґрунту встановлюють сталеве різальне кільце, до якого прикладають напрямний циліндр пристрою. Далі різальне кільце вдавлюють в ґрунт за допомогою поршня, після чого акуратно підкопують ножем. Ґрунт, що залишався на краях різального кільця, зрізають в рівень із його верхнім та нижнім краєм [64].

Відібраний зразок загортають у папір чи марлю та прикріплюють дві етикетки: одну поміщають разом із зразком, іншу – зовні під шпагат. На етикетках зазначають:

- назву організації, що проводить дослідження,
- область, район та землекористування, де здійснювався відбір,
- номер розрізу та тип ґрунту,
- горизонт і глибину відбору (ці дані також фіксуються у робочому журналі).

Маса зразка не повинна перевищувати одного кілограма. Після відбору зразки висушують до повітряно-сухого стану. Зберігання у вологому стані, а також висушування на сонці або в печі не допускається, оскільки це може спотворити результати аналізу нітратів, водорозчинної фосфатної кислоти та калію.

2.3.2. Визначення густини ґрунту

Густина ґрунту — це маса абсолютно сухого ґрунту в непорушеному стані, виражена в г/см³. Оскільки ґрунт є полідисперсною пористою системою, він завжди містить певну кількість пор різного розміру, розташованих між твердими частинками. Визначення густини ґрунту ґрунтується на співвідношенні маси сухого ґрунту до об'єму, який він займає в природному, неушкодженному стані [65].

Густина ґрунту є важливим фізико-механічним показником і варіює від 0,2 до 1,8 г/см³. Найнижчі значення характерні для торф'яних і лісових ґрунтів, найвищі - для оголених ґрунтів і материнських порід.

В середньому густина ґрунту становить 1,2 г/см³, що відповідає ущільненому, глинистому типу ґрунту з високою щільністю, який доволі складно копати. Така густина є сприятливою для росту рослин, адже забезпечує належну водо- і повітропроникність, що сприяє їх водозабезпеченню. Для

порівняння, при густині 1,6–1,7 г/см³ коренева система деревних порід практично не проникає в ґрунт.

Густину ґрунту (d_1) визначали термоваговим методом.

Зразки, відібрані за допомогою приладу Литвинова, поміщали у попередньо зважені бюкси, після чого зважували їх у вологому стані. Потім зразки висушували до постійної маси при температурі 150 °С протягом 6–8 годин. Після висушування гарячі бюкси закривали кришками та переносили в ексикатор із хлористим кальцієм для охолодження. Остаточне зважування проводили після повного охолодження зразків.

Розрахунок густини здійснювали за формулою як відношення маси сухого ґрунту до його об'єму в природному, непорушеному стані:

$$d_1 = m/V_{н.с.} \quad (2.1)$$

де: d_1 – густина ґрунту; m – маса зразка в абсолютно сухому стані; $V_{н.с.} = V_{тв.ч.} + V_{пор.}$; $V_{пор.}$ – об'єм пор; $V_{тв.ч.}$ – об'єм твердих частинок ґрунту.

2.3.3. Визначення густини твердої фази ґрунту

Стандартним показником для ґрунту також є густина твердої фази ґрунту, Густина твердої фази ґрунту визначали відношенням маси ґрунту до сумарного об'єму твердих частинок [66].

Для визначення показника (питомої ваги) твердої фази ґрунту користуються пікнометричним методом, що дає змогу визначити сумарний об'єм твердих частинок ґрунту за масою води, яка витісняється цим об'ємом з пікнометра.

Питома вага твердої фази ґрунту - співвідношення ваги твердої частини ґрунту певного об'єму до ваги води такого ж об'єму за температури 40 °С. На значення питомої ваги впливають вміст гумусу та мінералогічний склад ґрунту; у середньому вона становить 2,5–2,65 г/см³.

Цей показник важливий для розрахунку шпаруватості (пористості) ґрунту, зокрема під час проведення механічного аналізу. Визначення питомої ваги здійснюється на зразках ґрунту з порушеною структурою (розтертих до порошкоподібного стану) пікнометричним методом - шляхом вимірювання об'єму, який займає наважка ґрунту в мірній колбі на 100 мл за принципом витіснення води [64,65,67].

На аналітичних вагах відважують 10 г повітряно-сухого ґрунту. Окремо визначають вміст гігроскопічної вологи для корекції результатів.

У колбі кип'ятять 200–500 мл дистильованої води впродовж 30 хвилин для видалення розчиненого повітря, після чого охолоджують її до кімнатної температури.

Пікнометр об'ємом 100 мл заповнюють підготовленою водою до мітки, після чого зважують на аналітичних вагах. Необхідно зафіксувати температуру першого зважування.

З пікнометра обережно зливають приблизно половину води, після чого через воронку пересипають туди раніше зважену пробу ґрунту. Частинки ґрунту, що залишилися у воронці, ретельно змивають дистильованою водою всередину пікнометра. Отриману суміш кип'ятять на електроплитці 30 хвилин, уникаючи розбризкування.

Після завершення кип'ятіння пікнометр охолоджують до початкової температури, доливають дистильовану воду (яка залишилася після кип'ятіння) до мітки, і повторно зважують.

Питому вагу ґрунту обчислюють за формулою:

$$D = B / (A + B - C) \quad (2.2)$$

де: D – питома вага твердої фази ґрунту, г/см³; B – наважка сухого ґрунту, г; A – маса пікнометра наповненого водою, г; C – маса пікнометра з водою та ґрунтом, г.

2.3.4. Визначення пористості ґрунту

Пористість розраховують за показниками густини ґрунту та густини твердої фази ґрунту.

Пористість ґрунту визначають у відсотках до загального об'єму ґрунту в його природному (непорушеному) стані. Цей показник характеризує форму та розміри пор, що розміщені між структурними одиницями ґрунту. Висока пористість у верхніх горизонтах ґрунту є важливою умовою його родючості та позитивно впливає на розвиток і стійкість лісових екосистем.

Однак не лише загальний рівень пористості має значення — важливим є також розподіл пор за розмірами. Їх поділяють на макропори та мікропори. Макропори, або великі порожнини, швидко відводять надлишкову воду, полегшують переміщення води та повітря в ґрунті[68]. Вони сприяють ефективній аерації, покращують фільтрацію та дренаж. Ґрунти з високим вмістом макропор зазвичай є піщаними й утримують менше вологи [69].

Натомість мікропори, дрібні порожнини, затримують воду довше, обмежуючи її витікання, але при цьому перешкоджають вільному руху повітря. Така обмежена аерація негативно впливає на ріст рослин, оскільки коренева система потребує кисню для дихання. Багатьом ґрунтовим мікроорганізмам також потрібен кисень, тож при недостатній вентиляції сповільнюються життєво важливі біологічні й хімічні процеси [70].

Процес агрегації - об'єднання ґрунтових частинок в агрегати сприяє формуванню більших макропор між агрегатами, покращуючи аерацію та доступність ґрунту для коренів. Водночас мікропори всередині агрегатів забезпечують накопичення води. Оптимальний баланс між макро- й мікропорами необхідний для успішного вирощування сільськогосподарських культур: він забезпечує достатній обмін повітря й збереження вологи в ґрунті.

Знаючи значення загальної густини ґрунту та питомої густини твердої фази, можна розрахувати загальну пористість за відповідною формулою:

$$P_{заг.} = (1 - d_1/d) \cdot 100 \quad (2.3)$$

де $P_{заг.}$ – загальна пористість, % від об'єму ґрунту; d_1 – густина ґрунту, г/см³; d – густина твердої фази ґрунту, г/см³

Знаючи показники загальної пористості ґрунту та його вологість, можна розрахувати пористість аерації - тобто ступінь забезпечення ґрунту повітрям. Цей показник виражається у відсотках до загального об'єму. Для обчислення спершу визначають об'ємну вологість ґрунту. Це здійснюється шляхом множення масової (вагової) вологості на густину ґрунту. Отримане значення відповідає об'єму пор, заповнених водою:

$$P_w = d_1 \cdot W, \quad (2.4)$$

де P_w – об'єм шпарин ґрунту, зайнятих водою (вміст води у об'ємних відсотках); W – вологість ґрунту, %; d_1 – густина ґрунту, г/см³.

Різниця між загальною пористістю та вологістю, яка виражається в об'ємних відсоках, дає пористість аерації, або забезпеченість ґрунту повітрям[67,71]:

$$P_{аер.} = P_{заг.} - P_w \quad (2.5)$$

2.3.5. Визначення рН ґрунту

Кислотність ґрунту не є його морфологічною (зовнішньою) характеристикою, оскільки це фізико-хімічна властивість, що формується в процесі ґрунтоутворення під впливом різних чинників. Водночас реакція ґрунтового розчину є надзвичайно важливою характеристикою, яка впливає на генетичні та виробничі властивості ґрунту, зокрема його родючість. Крім того, вона слугує однією з діагностичних ознак ґрунту, що обґрунтовує необхідність розгляду кислотності у взаємозв'язку з його морфологічними характеристиками.

Визначення рН ґрунтового розчину здійснювали потенціометричним методом

Потенціометричний метод є широко використовуваним методом вимірювання рН ґрунтових розчинів. Цей метод передбачає використання рН-метра зі скляним електродом для вимірювання активності іонів водню в ґрунтовій суспензії.

Обладнання та матеріали:

- рН-метр зі скляним електродом (має бути відкалібрований перед використанням). Вимірювання автоматичним рН-метром Mettler Toledo SevenCompact S220-Kit (Рис. 2.2).
- дистильована або деіонізована вода;
- розчин електроліту (для електродів);
- буферні розчини (рН 4,0, 7,0 і 10,0 для калібрування);
- склянки або пластикові стакани;
- магнітна мішалка (опціонально);
- зразок ґрунту;
- ваги для зважування;
- піпетка або мірний циліндр;
- фільтрувальний папір (за необхідності).

Підготовка ґрунту.

Висушують зразок ґрунту на повітрі при кімнатній температурі та просіюють через сито з отворами 2 мм, щоб видалити великі частки та сміття.

Приготування ґрунтової суспензії.

Зважують 10 г ґрунту і поміщають його в чисту склянку. Додають 25 мл дистильованої води (для визначення рН у воді) або 0,01М розчину CaCl_2 (для визначення рН у розчині солі, який зменшує варіабельність за рахунок іонної сили). Ретельно перемішують суміш і залишають її на 30-60 хвилин, щоб суспензія врівноважилася.

Калібрування рН-метра.

Перед вимірюванням відкалібровують рН-метр, використовуючи буферні розчини (рН 4,0, 7,0 і 10,0). Між калібруваннями промивають електрод дистильованою водою.

Вимірювання показів.

Занурюють електрод у ґрунтову суспензію, переконавшись, що він повністю занурений, але не торкається дна склянки. Обережно перемішують розчин (або використовують магнітну мішалку) і чекають стабілізації показів. Фіксують значення рН, що відображається на вимірювачі.

Очищення та зберігання.

Промивають електрод дистильованою водою після кожного вимірювання. Зберігають електрод у відповідному розчині електроліту, коли він не використовується.



Рисунок 2.2 – рН-метр Mettler Toledo SevenCompact S220-Kit.

pH ґрунту у воді (pH H₂O) зазвичай використовується для загальної характеристики ґрунту. pH в 0,01M CaCl₂ (pH CaCl₂) є кращим для зменшення ефекту іонної сили і отримання більш послідовних результатів. Співвідношення ґрунту до рідини може змінюватися (1:2,5, 1:5) залежно від стандартних протоколів (наприклад, ISO 10390:2005, методи USDA Soil Survey).

Інтерпретація отриманих результатів

Отримані значення pH класифікують таким чином:

- < 4.5 – дуже кислий ґрунт
- 4.6 – 5.5 – кислий
- 5.6 – 6.5 – слабокислий
- 6.6 – 7.3 – нейтральний
- > 7.4 – лужний

Метод забезпечує точний і відтворюваний спосіб оцінки кислотності або лужності ґрунту, що має вирішальне значення для розуміння здоров'я ґрунту і доступності поживних речовин [72-74].

Висновки до розділу 2

1.В даному розділі наведена характеристика предмету та структурна схема логічності проведення досліджень.

2.Описано фізико-хімічні властивості речовин, що використовуються в процесі проведення експериментальних досліджень.

3. Наведені методики та прилади проведення експериментальних досліджень забезпечили отримання достовірних результатів.

РОЗДІЛ 3

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ХВОСТОСХОВИЩА СІРЧАНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ТЕРИТОРІЇ РЕЗЕРВАТУ «РОЗТОЧЧЯ»

Яворівський ДГХП «Сірка» є об'єктом інтенсивної промислової діяльності, що функціонував на території, які увійшли до транскордонного біосферного резервату «Розточчя», розташованого на кордоні Польщі та України. Українська частина резервату, включена до Всесвітньої мережі біосферних резерватів (2011 р.) та трансформована у транскордонний біосферний заповідник (2019 р.), характеризується унікальним поєднанням природних зон і високим рівнем біорізноманіття [75]. Яворівське ДГХП "Сірка" засноване в 1964 р., як головна сировинна база для виробництва фосфорних мінеральних добрив з проектною максимальною потужністю видобутку сірки 1750 тис. т у рік. Площа підприємства займає значну частину території Яворівського району й складала 6563,9 га. Яворівське ДГХП "Сірка" випускало природну сірку з руди, видобутої відкритим способом (Язівське родовище) та методом підземної виплавки (північні поклади Язівського й Немирівського родовища). Під час збагачення сірковмісної руди флотацією утворювалися рідкі відходи (хвости), які направлялися на зберігання у хвостосховища. Площа хвостосховища складала 679,8 га. Яворівський ДГХП «Сірка» припинив свою виробничу діяльність у 2006 р. [76]. Діяльність Яворівського ДГХП «Сірка» спричинила суттєві екологічні проблеми, зокрема забруднення водних ресурсів, деградацію ґрунтів, забруднення повітря та втрату біорізноманіття [77,78,79]. Відновлення територій та мінімізація наслідків потребують комплексного підходу, включаючи рекультивацію, очищення вод і заходи для відновлення природних екосистем. Ефективна рекультивація сприяє зменшенню техногенного впливу, відновленню екосистемної рівноваги та забезпеченню стабільності природних процесів [80,81,82,83].

3.1. Технологічні особливості функціонування хвостосховища

Значні масштаби виробництва сірки із застосуванням флотаційного методу її отримання призвели до накопичення значних обсягів відходів, що зберігаються у хвостосховищах. Ці об'єкти становлять серйозну екологічну загрозу через можливе забруднення природних ресурсів, викиди токсичних сполук у повітря та ризики аварійних ситуацій [84].

Хвостосховище виробництва сірки флотаційним методом є важливою частиною технологічного процесу. Флотаційний метод використовується для відокремлення сірки від інших мінералів шляхом утворення піни, в якій знаходиться сірка, яка піднімається на поверхню, тоді як інші мінерали опускаються. Особливість хвостосховища полягає в тому, що воно призначене для зберігання відходів (хвостів) після флотаційного процесу [85,86].

Основними елементами хвостосховища є огорожувальні дамби, лежа для накопичення відходів та системи дренажу. Огороджувальні дамби проєктуються з урахуванням міцності та стійкості до гідродинамічних навантажень, оскільки їх руйнування може призвести до екологічних катастроф. Згідно з ДБН В.2.4-5:2012, при проєктуванні дамб враховуються параметри міцності ґрунтів, сейсмічність району та можливі фільтраційні процеси [87].

Хвостосховища, що утворюються внаслідок виробництва сірки флотаційним методом, мають серйозний екологічний вплив через специфічний склад відходів і хімічні процеси, які відбуваються в них. Однією з головних проблем є хімічне забруднення води та ґрунту, адже флотаційні хвости містять залишки реагентів, таких як ксантогенати, сірковуглець і піногасники, які можуть проникати в підземні та поверхневі води. Крім того, у водах хвостосховищ утворюється кисле середовище, що сприяє розчиненню важких металів, таких як залізо, мідь, свинець і кадмій, які можуть накопичуватися в екосистемах і становити небезпеку для живих організмів. Значною проблемою

є також окислення сульфідів, які залишаються у відходах: під впливом кисню вони перетворюються на сірчану кислоту, що провокує явище кислотного дренажу, яке ускладнює ситуацію з забрудненням довкілля [84].

Ще одним негативним наслідком є виділення токсичних газів. У процесі окислення сульфідних відходів може відбуватися викид сірководню, який є отруйним і має різкий запах, а також діоксиду сірки, що сприяє утворенню кислотних дощів і погіршенню якості повітря в регіоні. Окрім цього, хвостосховища несуть значні аварійні ризики, оскільки нестабільність дамб або їх руйнування можуть призвести до масштабного викиду токсичних речовин у довкілля. Деякі компоненти відходів також можуть вступати в реакцію з водою або повітрям, що в окремих випадках здатне призвести до самозаймання або навіть вибухів.

Функціонування таких хвостосховищ також негативно впливає на біорізноманіття, адже через підвищену кислотність і токсичність вод вони стають непридатними для життя багатьох водних організмів. Забруднення прилеглих територій важкими металами та токсичними сполуками призводить до деградації рослинного покриву та загибелі місцевої флори і фауни. Особливо небезпечним є той факт, що навіть після припинення роботи підприємств такі хвостосховища залишаються джерелом забруднення упродовж десятиліть.

Кліматичні та геологічні умови значно впливають на безпеку та ефективність функціонування цих споруд. У районах із високими опадами існує ризик переповнення сховищ та розмиву дамб, що може спричинити витік відходів у навколишнє середовище. Наприклад, дослідження, проведене на території Калуського району Івано-Франківської області, показало, що значна кількість опадів може посилювати процеси розмиву дамб та просочування відходів у прилеглі території [84].

Повільне вивільнення токсичних речовин у навколишнє середовище зумовлює необхідність проведення спеціальних заходів з рекультивації,

зокрема нейтралізації кислотності шляхом вапнування, створення штучних ізоляційних бар'єрів і застосування біоре mediaції [88,89].

Процеси висихання хвостосховищ сприяють утворенню пилу, який містить небезпечні хімічні елементи, здатні переноситися на великі відстані, погіршуючи якість повітря та спричиняючи респіраторні захворювання.

Функціонування хвостосховищ виробництва сірки потребує комплексного підходу, що включає як технічні, так і екологічні аспекти. Впровадження сучасних технологій захисту довкілля, моніторингу та рекультивації є ключовими кроками для зменшення негативного впливу цих об'єктів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення систем управління хвостосховищами та пошук інноваційних рішень для безпечної утилізації відходів [86,90,91].

3.2. Екосистемна характеристика території хвостосховища

Екосистемна характеристика – це комплексний опис екосистеми, що включає її склад, структуру, функціонування, динаміку та екологічні взаємозв'язки. Вона охоплює біотичні компоненти (продуценти, консументи, редуценти) та абіотичні фактори (клімат, рельєф, ґрунти, вода, хімічний склад середовища). Функціонування екосистеми базується на кругообігу речовин, енергетичних потоках і механізмах саморегуляції. Важливим аспектом є її динаміка, зокрема природні зміни (сукцесія) та рівень стійкості до зовнішніх впливів. Екологічні зв'язки проявляються через харчові ланцюги, симбіоз, конкуренцію та взаємодію між організмами. Важливим показником стійкості екосистеми є біорізноманіття живих організмів. Дослідження біорізноманіття техногенних екосистем є критично важливими з причин відновлення екологічного балансу, моніторингу екологічного стану, формування ефективних стратегій рекультивації, тощо [92, 93]

Техногенно порушені території (шахти, кар'єри, промислові зони, відвали) мають значні порушення ґрунтового покриву, водного режиму та біотичних компонентів. Вивчення біорізноманіття дозволяє оцінити здатність екосистем до самовідновлення та адаптації до змінених умов. Біорізноманіття є важливим індикатором екологічного стану території. Видовий склад рослин і тварин розглядається як індикатор рівня забруднення, токсичності ґрунтів і води, а також загального рівня деградації або відновлення екосистеми. Вивчення видів, що природним шляхом заселяють техногенні території, допомагає розробляти природоорієнтовані методи рекультивації. Наприклад, використання стійких до важких металів рослин у фіторе mediaції сприяє очищенню та стабілізації забруднених територій. У техногенних екосистемах можуть формуватися унікальні біоценози з адаптованими до екстремальних умов видами. Зміни у видовому складі біоти можуть мати довготривалі наслідки, такі як втрата екосистемних послуг, порушення біологічних ланцюгів живлення, зменшення запилювачів тощо. Біорізноманіття є основою сталого розвитку, оскільки сприяє підтриманню продуктивності екосистем, регуляції клімату, очищенню води та повітря.

Дослідження екосистемних характеристик техногенно порушених територій є важливим напрямом екологічної науки, особливо в контексті відновлення природних ландшафтів після промислової діяльності. Проте багато аспектів трансформації екосистем залишаються недостатньо вивченими, зокрема процеси природної сукцесії на територіях хвостосховищ та вплив рекультиваційних заходів на біорізноманіття. Важливим показником здатності екосистем до відновлення на пост техногенних територіях є їх біотичний потенціал. Він визначає, наскільки ефективно екосистема може підтримувати стабільне біорізноманіття, протистояти зовнішнім впливам і самовідновлюватися після порушень. У природних екосистемах він забезпечує самопідтримку та баланс популяцій, тоді як у техногенних ландшафтах його

відновлення вимагає активного екологічного менеджменту та застосування природоорієнтованих підходів до рекультивації.

Цей промисловий майданчик є прикладом антропогенно зміненого середовища, де відновлення природних процесів ускладнене через попередню господарську діяльність. Дане підприємство здійснювало свою виробничу діяльність у межах транскордонного біосферного резервату «Розточчя», розташованого на кордоні Польщі та України. Українська частина резервату, включена до Всесвітньої мережі біосферних резерватів (2011 р.) та трансформована у транскордонний біосферний заповідник (2019 р.), характеризується унікальним поєднанням природних зон і високим рівнем біорізноманіття [75]. У період своєї роботи з 1964 по 2006 роки підприємство спричинило значні трансформації екологічного стану регіону. [76,77,78,79].

Екосистемна характеристика території Яворівського ДГХП «Сірка» свідчить про суттєве порушення біотичних компонентів та необхідність заходів щодо їх відновлення. Особливу увагу слід приділити відновленню ґрунтового покриву, водного балансу, формуванню стійких біоценозів та забезпеченню умов для природної сукцесії. Важливими заходами є рекультивація, біологічне відновлення, реінтродукція втрачених видів і створення сприятливих умов для розвитку природних екосистем [92,93,94,95,96].

У дослідженні використано просторові дані, картографічні матеріали, зокрема, карта функціонального зонування біосферного резервату «Розточчя», (рис.3.1) та екологічні характеристики території. Інформація була зібрана на основі аналізу літературних джерел, результатів польових досліджень та даних дистанційного зондування. Польові дослідження включали маршрутні обстеження та візуальні спостереження: Даний метод полягає у безпосередньому спостереженні та реєстрації видів, що зустрічаються на маршруті дослідження. Він є особливо ефективним для вивчення великих та добре помітних організмів, таких як дерева, чагарники, великі ссавці, птахи

тощо. Це прямий метод вивчення взаємодії між організмами у природному середовищі.

Структуру дослідження подано за наступними блоками:

- Опис природних екосистем (лісових, лучно-степових, болотних).
- Аналіз техногенних екосистем (хвостосховище, кар'єри, відвали, кислотні озера).
- Порівняльна характеристика природних і техногенних ділянок з врахуванням ґрунтових, водних та біологічних параметрів.

Як зазначено вище, техногенні об'єкти Яворівського ДГХП «Сірка» розташовані у регіоні Розточчя – природному і культурному прикордонному районі, що межує з Львовом (Україна) та Замостям (Польща). Загальна площа української частини транскордонного біосферного резервату складає 74 887 га, а вся територія заповідника – 371 902 га. Функціональне зонування резервату включає:

- Природне ядро (3325 га);
- Буферну зону (11 800 га);
- Транзитну зону (59 762 га).

Територія біосферного заповідника включає типові для Розточчя ліси (47,1%), луки (8,4%), водно-болотні угіддя (1%), водні екосистеми (3,5%) [97]. Лісові масиви є одним із ключових елементів території. Серед домінуючих деревних порід – дуб звичайний (*Quercus robur*), бук лісовий (*Fagus sylvatica*), сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) та граб звичайний (*Carpinus betulus*). Фауна представлена великим числом видів, зокрема козулею європейською (*Capreolus capreolus*), кабаном диким (*Sus scrofa*), білкою звичайною (*Sciurus vulgaris*), а також різноманітними видами птахів (сова сіра *Strix aluco*, дятел строкатий *Dendrocopos major*). Промислове видобування сірки призвело до фрагментації лісових масивів, що має негативний вплив на місцеве біорізноманіття.

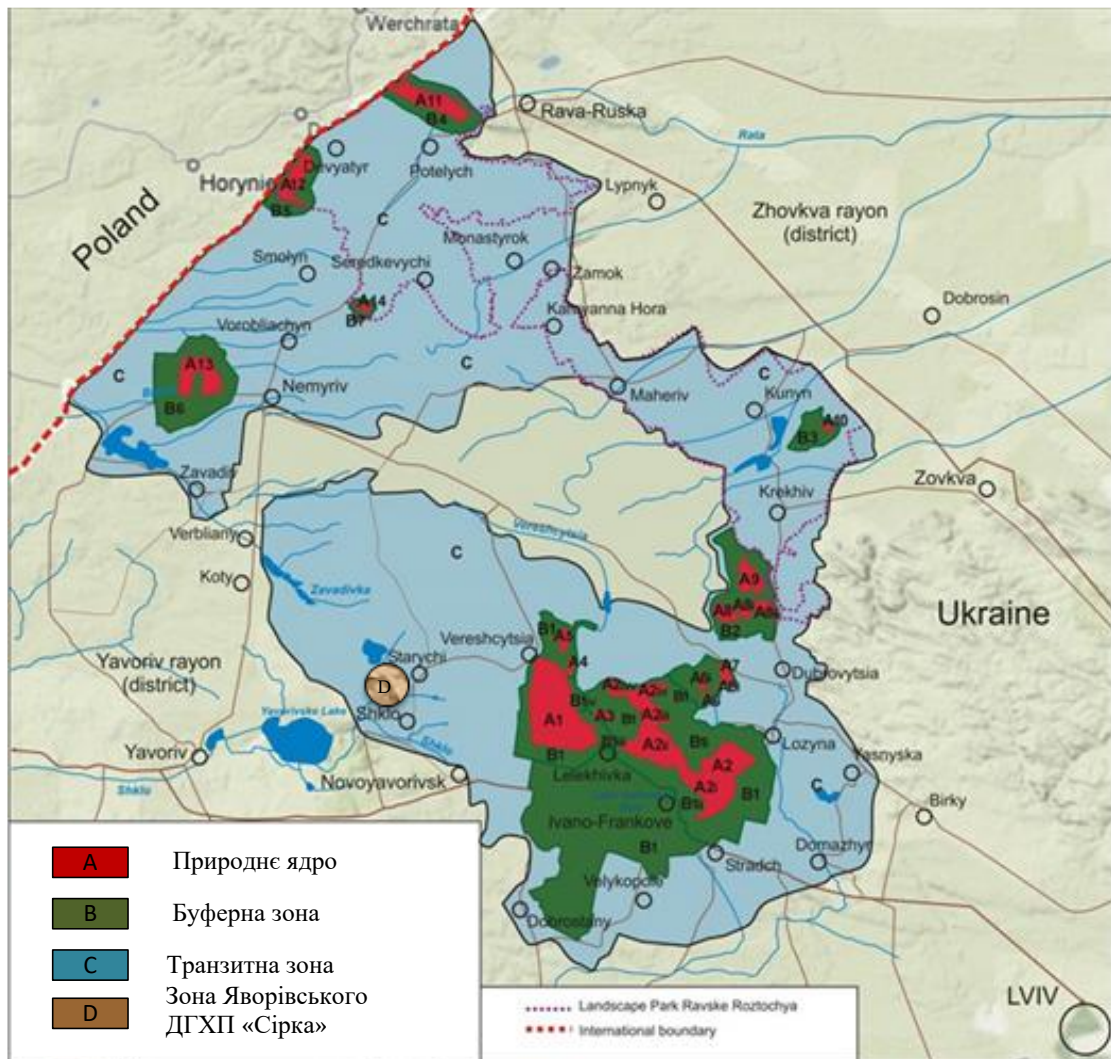


Рисунок 3.1. – Карта функціонального зонування біосферного резервату «Розточчя»

Лучно-степові екосистеми відкритих ділянок, що збереглися в околицях техногенних територій, характеризуються типово для лучно-степових зон. Флора представлена ковилою волосистою (*Stipa capillata*), шавлею лучною (*Salvia pratensis*) та тимофіївкою лучною (*Phleum pratense*). Фауна включає дрібних ссавців (мишки, полівки) та степових птахів (жайворонок польовий *Alauda arvensis*, перепілка звичайна *Coturnix coturnix*). Проте, поступове заростання чагарниками та зменшення площ типових степових фрагментів під впливом антропогенних факторів створюють загрозу для даних екосистем.

Болотні екосистеми регулюють водний режим території та сприяють збереженню високого рівня біорізноманіття. Вони є осередками для рідкісних видів рослин і тварин, пристосованих до умов підвищеної вологості.

Унікальність регіону «Розточчя» полягає у поєднанні лісів, луків, боліт та водойм. Резерват розташований на стику різних природних зон, що забезпечує високий рівень видового різноманіття. Територія належить до екорегіону змішаних лісів Центральної Європи, з південним впливом Карпатського лісового екорегіону. Поряд із цим, територія виконує роль природного бар'єру для поширення окремих видів, наприклад, бука європейського, поширення якого обмежено північно-східною межею [98,99,100,101,102].

Досліджували техногенні екосистеми, що сформувалися на території хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» (рис.3.1), яке використовувалося для складування відходів видобутку та переробки сірки. На його території сформувалися особливі екосистеми, які характеризуються своїми специфічними ознаками. Територія хвостосховища має плоску або слабкохвилясту топографію з нерівностями, сформованими внаслідок відкладання шламів та відходів виробництва. Після припинення виробництва сірки сформовані техногенні ґрунти з високим рівнем засоленості та хімічного забруднення (сульфати, важкі метали, токсичні сполуки), бідні на органічні речовини (рис.3.2). На частині територій розвиваються рудеральні екосистеми, де поширені стійкі до забруднення види, зокрема осот (*Cirsium*), щавель кінський (*Rumex confertus*), кропива дводомна (*Urtica dioica*). На початкових стадіях сукцесії переважають галофітні види (солянка, кермек). Місцево проводяться заходи з висаджування деревно-чагарникових насаджень (сосна звичайна, береза) для стабілізації ґрунтів. Різноманіття рослинного покриву є низьким через екстремальні умови середовища.



Рисунок 3.2. – Фрагмент техногенної екосистеми, що утворилася на території
хвостосховища

Тваринний світ представлений переважно безхребетними видами, адаптованими до засолених умов (комахи, павукоподібні). Серед хребетних переважно перебувають птахи, зокрема водоплавні та болотні види (Крижень (*Anas platyrhynchos*), Чирянка мала (*Anas crecca*), Сіра чапля (*Ardea cinerea*)), тоді як ссавці зустрічаються рідко через обмежену кормову базу.

Важливим показником екологічного стану екосистеми є її трофічна структура. Вона відображає структуру живлення організмів, механізми кругообігу речовин та потоки енергії. Трофічна структура визначає стабільність екосистеми, її продуктивність і здатність до самовідновлення. У природних екосистемах, таких як лісові, лучно-степові та болотні біоценози біосферного резервату «Розточчя», трофічні ланцюги мають розгалужену багаторівневу структуру, що сприяє їхній екологічній стійкості.

На першому трофічному рівні знаходяться продуценти – рослини, які за допомогою фотосинтезу акумулюють сонячну енергію. До них належать дерева

(дуб, бук, сосна), трав'янисті рослини (ковила, шавлія, тимофіївка), водні макрофіти (очерет, осока). Ці види формують основу живлення для консументів першого порядку – трав'яїдних тварин, серед яких козуля, білка, гризуни, водні безхребетні та деякі птахи.

Консументи другого порядку – це хижаки та комахоїдні організми, які регулюють чисельність популяцій трав'яїдних видів. У природних екосистемах до них належать сова сіра, яструб, лисиця, ласка, а також водоплавні птахи (крижень, чапля). Завершують трофічний ланцюг редуценти – бактерії, гриби та детритофаги, які забезпечують розкладання органічних залишків і повернення поживних речовин у ґрунт або воду.

У техногенних екосистемах, що виникли на території хвостосховища і кар'єрів, трофічні ланцюги є значно спрощеними. Через екстремальні умови середовища тут проживають лише стійкі до забруднення види рослин (осот, кропива, солянка), невелика кількість комах і дрібних гризунів, тоді як чисельність хижаків та редуцентів є обмеженою. Це робить техногенні екосистеми менш стабільними, з низькою продуктивністю і повільними сукцесійними процесами.

Порівняльні характеристики природних та техногенних екосистем наведений у таблиці 3.1.

Одним із ключових факторів, що визначають структуру та функціонування екосистем є ґрунтові умови. Вони впливають на видовий склад рослинності, продуктивність біоценозів, стійкість до змін середовища та здатність до самовідновлення. У природних екосистемах, зокрема лісових, лучно-степових і болотних біоценозах біосферного резервату «Розточчя», ґрунти характеризуються високим рівнем родючості, добре розвинутим гумусовим шаром і стабільними фізико-хімічними властивостями.

Таблиця 3.1

Основні відмінності між природними та техногенними екосистемами

Показник екосистеми	Природні екосистеми	Техногенні екосистеми
Ландшафт та ґрунти	характеризуються родючими ґрунтами з високим вмістом гумусу	зненежені, засолені та еродовані ґрунти
Біорізноманіття	високий видовий склад флори та фауни	домінують стійкі до забруднення види з менш різноманітними біоценозами
Водні екосистеми	є чистими	характеризуються підвищеною кислотністю та мінералізацією
Сукцесія та відновлення	мають високу здатність до самовідновлення	потребують тривалих рекультиваційних заходів.

На хвостосховищі Яворівського ДГХП «Сірка», ґрунтові умови є вкрай несприятливими для розвитку біоти. Вони характеризуються високою засоленістю, кислотністю, низьким вмістом гумусу, порушеною структурою та наявністю токсичних речовин (важкі метали, сульфати, залишки промислових відходів). У таких умовах процеси ґрунтоутворення відбуваються дуже повільно, що значно обмежує розвиток рослинності та біотичних угруповань [103].

Аналіз трофічної структури показав, що у природних екосистемах біосферного резервату «Розточчя» є високий біотичний потенціал завдяки розгалуженим трофічним зв'язкам, великій кількості видів та їхній здатності до адаптації. Лісові екосистеми з різноманітним рослинним покривом (дуб, бук, сосна, граб) та багатою фауною (козуля, білка, сова, лисиця) демонструють

високу саморегуляцію і стійкість до природних змін. Лучно-степові та болотні екосистеми, хоча і більш вразливі до антропогенних впливів, також володіють значним біотичним потенціалом через здатність рослин і тварин швидко пристосовуватися до змін умов середовища.

Натомість у техногенних екосистемах біотичний потенціал є низьким. Забруднені та засолені ґрунти хвостосховищ, нестача поживних речовин і води, високий рівень токсичних речовин суттєво обмежують можливості розвитку флори та фауни. Тут домінують стійкі до несприятливих умов рослини (осот, кропива, солянка) і невелика кількість адаптованих тварин, що значно знижує рівень біорізноманіття. Процеси природної сукцесії проходять повільно, і без втручання людини (рекультивация, фіторе mediaція) відновлення екосистеми може тривати століттями.

Результати дослідження підтверджують, що територія Яворівського ДГХП «Сірка» зазнала істотних змін внаслідок інтенсивної промислової діяльності. Аналіз структури природних та техногенних екосистем показав значні відмінності між ними, що проявляється в деградації ґрунтів, зміні гідрологічного режиму та зниженні рівня біорізноманіття. Особливо важливими є зміни в хімічному складі ґрунтів і води, що визначає умови існування рослинних і тваринних угруповань.

Незважаючи на значні екологічні порушення, спостерігається природне заростання техногенних територій, що вказує на потенціал екосистем до самовідновлення. Виявлено, що на початкових стадіях сукцесії домінують рудеральні та галофітні види, що свідчить про адаптацію до екстремальних умов. Водночас відсутність достатньої кількості органічної речовини та висока мінералізація ґрунтів значно уповільнюють процеси екологічної реабілітації.

Дані дослідження також підкреслюють важливість транскордонного підходу до управління природоохоронними територіями, адже регіон «Розточчя» виконує функцію екологічного коридору для багатьох видів. Збереження його екосистем потребує комплексного підходу, що включає

моніторинг екологічного стану, рекультиваційні заходи та міжнародну співпрацю.

Таким чином, результати дослідження є важливими для розробки подальших стратегій екологічного відновлення регіону та мінімізації антропогенного впливу. Використання природоорієнтованих методів рекультивації може стати основою для довготривалого відновлення екосистемного балансу та підтримання сталого розвитку біосферного резервату.

Порівняльний аналіз природних та техногенних екосистем вказує на різке зниження рівня екологічної стійкості в зонах промислового впливу. Водночас дослідження показали наявність природних процесів сукцесії, що свідчить про можливість екологічної реабілітації територій. Ефективна рекультивація із застосуванням природоорієнтованих методів, таких як фіторе mediaція та заліснення, може сприяти відновленню екосистемного балансу. Транскордонний статус біосферного резервату відкриває перспективи міжнародної співпраці для збереження та відновлення унікального природного комплексу.

Висновки до розділу 3

1. Масштабне виробництво сірки флотаційним методом призвело до накопичення значних обсягів відходів у хвостосховищах, що становлять серйозну екологічну загрозу. Основними проблемами є хімічне забруднення води та ґрунту, утворення кислотного дренажу, виділення токсичних газів.

2. Дослідження впливу промислової діяльності Яворівського ДГХП «Сірка» на екосистеми біосферного резервату «Розточчя» показало, що тривала експлуатація сірчаних родовищ спричинила деградацію ґрунтів, забруднення водних ресурсів, фрагментація лісових масивів та скорочення біорізноманіття.

3. Порівняльний аналіз природних та техногенних екосистем вказує на

різке зниження рівня екологічної стійкості в зонах промислового впливу. Водночас дослідження показали наявність природних процесів сукцесії, що свідчить про можливість екологічної реабілітації територій.

4. Для зменшення негативного впливу необхідний комплексний підхід, що включає впровадження сучасних технологій захисту довкілля, систем моніторингу та рекультивації.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ ХВОСТОСХОВИЩА ЯВОРІВСЬКОГО ДГХП «СІРКА»

Яворівське ДГХП "Сірка" було одним із найбільших промислових об'єктів України, пов'язаних із видобутком і переробкою сірки. Внаслідок діяльності підприємства на території Львівської області сформувалися значні площі техногенно порушених земель, серед яких особливу небезпеку становлять хвостосховища. Ці території характеризуються підвищеною кислотністю ґрунтів, високими концентраціями токсичних елементів та низькою біологічною продуктивністю.

Дослідження біотичного потенціалу території хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» є надзвичайно актуальними для розуміння подальшої стратегії відновлювальної діяльності. Відходи виробництва, що містять токсичні речовини, спричинили деградацію ґрунтового покриву, зміну гідрологічного режиму та порушення екосистемного балансу. Вивчення біотичного потенціалу дозволяє оцінити здатність екосистеми до самовідновлення та визначити механізми природного відродження рослинного покриву.

Аналіз флористичного складу, рівня хлорофілу, видового різноманіття та стійкості рослин є необхідним для розуміння поточних процесів регенерації та розробки ефективних рекультиваційних заходів. Моніторинг змін у рослинності та ґрунтах допомагає оцінити ефективність природного відновлення та вчасно коригувати методи екологічної реабілітації. Оскільки без належного контролю деградаційні процеси можуть прогресувати, такі дослідження є ключовими для запобігання подальшому забрудненню та втраті біорізноманіття.

Крім екологічного значення, ці дослідження важливі у контексті євроінтеграційних зобов'язань України, зокрема виконання екологічних норм ЄС. Впровадження науково обґрунтованих заходів із рекультивації сприятиме

гармонізації природоохоронної політики держави з європейськими стандартами та покращенню екологічної ситуації у регіоні. Таким чином, вивчення біотичного потенціалу хвостосховища є важливим кроком до його відновлення, що сприятиме формуванню стабільної та саморегулюючої екосистеми.

У даному розділі наведені результати досліджень з оцінювання біотичного потенціалу хвостосховища Яворівського ДГХП "Сірка" шляхом аналізу стану рослинного покриву, ґрунтового складу та природних процесів сукцесії.

4.1. Дослідження стану рослинності території хвостосховища

Важливим аспектом відновлення екосистем є оцінка біотичного потенціалу території. Біотичний потенціал визначає здатність екосистеми підтримувати стабільне біорізноманіття, відновлюватися після порушень та адаптуватися до нових умов. У природних екосистемах цей потенціал забезпечує баланс популяцій та їхню стійкість до змін середовища, тоді як у техногенно порушених ландшафтах його відновлення вимагає активного екологічного менеджменту та застосування природоорієнтованих підходів до рекультивації.

Основними показниками біотичного потенціалу є рівень біорізноманіття, відновлення рослинного покриву, чисельність і різноманітність тварин, стабільність трофічних ланцюгів, а також здатність екосистеми до саморегуляції. Дослідження видового складу рослин на посттехногенних територіях дає змогу оцінити їхню здатність до виживання в екстремальних умовах та механізми природної сукцесії

Для аналізу стану рослинного покриву було використано методи пробних площ та геоботанічного картування. Дослідження проводилося на 12 пробних ділянках, що охоплюють різні зони хвостосховища:

- центральна частина (найбільш забруднена, відкрита поверхня без значної рослинності);

- околиця хвостосховища (умовно стабільніші ділянки, частково колонізовані рослинами);
- контрольна зона (прилеглі природні екосистеми для порівняльного аналізу).

Основні параметри дослідження:

- видовий склад рослин та їхня проективна покривність;
- фізіологічний стан рослин (наявність хлорозу, деформацій);
- наявність сукцесійних процесів (поширення мохів, лишайників, трав'янистих рослин).

У ході дослідження стану рослинності на території хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» було проведено комплексне польове і лабораторне обстеження, щоб отримати максимально об'єктивну картину екологічного стану території.

На початковому етапі було визначено межі досліджуваної території на основі топографічних карт та супутникових знімків. Це дало змогу поділити хвостосховище на три зони, що відрізняються за ступенем деградації рослинного покриву: центральну частину, околицю та перехідну зону, яка межує з природними екосистемами. Розбиття території на ці три основні зони дозволило оцінити відновлення рослинного покриву за допомогою різних показників (рис.4.1).

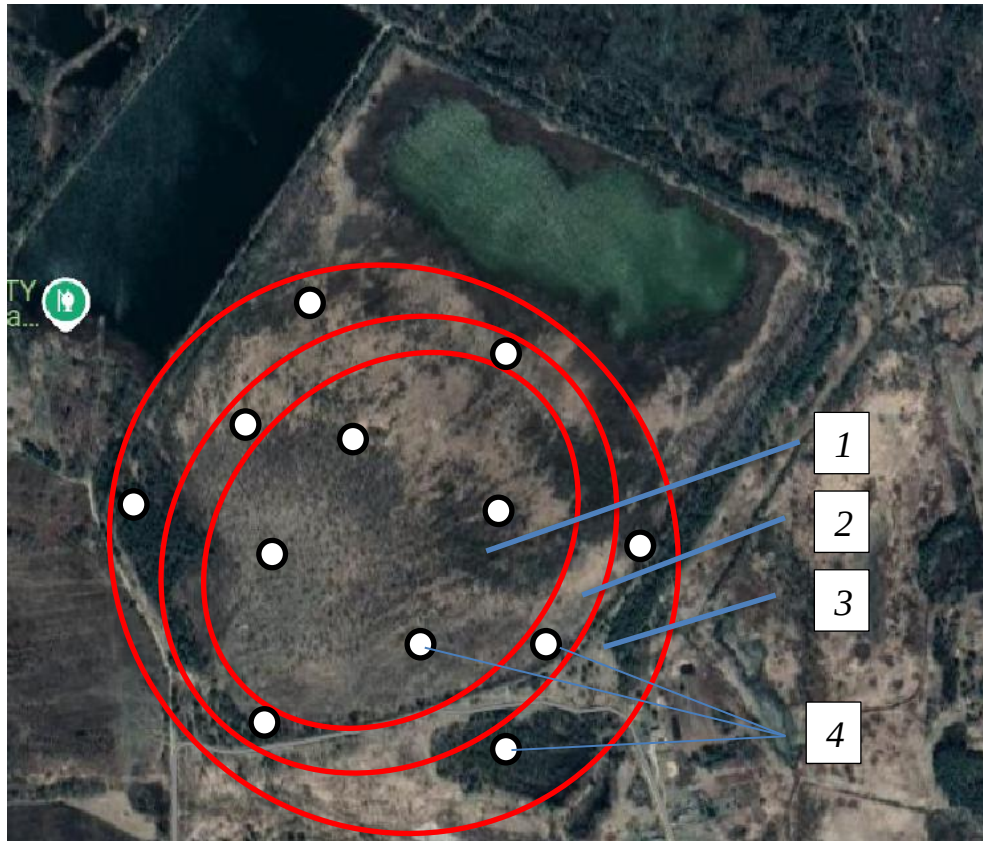


Рисунок 4.1. – Зони хвостосховища: 1- центральна частина, 2 - околиця хвостосховища, 3 - контрольна зона; 4 – розташування пробних ділянок

Після визначення меж зон, було закладено 12 пробних ділянок, по 4 в кожній зоні. Для кожної ділянки обрано розмір 10×10 м, що дозволяло точно оцінити покриття рослинністю та види, що на ній зростають. Вибір саме такого розміру ділянок був зумовлений необхідністю врахування всіх факторів, таких як видове різноманіття, щільність покриття та місцеві екологічні умови. Розташування пробних ділянок забезпечує репрезентативне охоплення всіх екологічних зон хвостосховища: центральної частини (зона максимального забруднення), перехідної зони та околиць. Розташування пробних ділянок здійснювали за такою схемою:

- центральна частина хвостосховища (найбільш забруднена зона) - ділянки розташовані рівномірно по площі центральної частини, орієнтація по головній вісі забруднення;

- перехідна зона (зона часткового відновлення) - ділянки на межі центральної та прилеглої території, включає рослинність, що починає відновлюватися;
- околиця хвостосховища (зона з найкращими умовами) - ділянки у природній рослинності біля меж хвостосховища.

Для фіксації проективного покриття рослин на кожній ділянці використовувалась візуальна оцінка покриття рослинністю та встановлення квадрантів (0.25 м²) для точнішого обрахунку щільності трав'янистих рослин.

Це дало змогу отримати дані про загальний рівень покриття рослинами на відповідних ділянках. У таблиці 4.1. наведено експериментальні результати та розраховано середнє значення:

Таблиця 4.1.

Результати досліджень загальний рівень покриття рослинами

№	Ділянка	Покриття рослинністю (%)	
		На кожній ділянці	Середнє
1	Ц1 (центр)	7	6,5
2	Ц2 (центр)	5	
3	Ц3 (центр)	8	
4	Ц4 (центр)	6	
5	О1 (околиці)	30	32,5
6	О2 (околиці)	25	
7	О3 (околиці)	35	
8	О4 (околиці)	40	
9	П1 (перехідна зона)	60	61,25
10	П2 (перехідна зона)	50	
11	П3 (перехідна зона)	65	
12	П4 (перехідна зона)	70	

Паралельно з вимірюванням покриття рослинністю, проводилися флористичні обліки для виявлення видового складу рослин на кожній ділянці. За допомогою визначників рослин та на основі досвіду польових досліджень було здійснено ідентифікацію видів рослин, що зустрічалися на кожній пробній площі. Крім того, визначався рівень частоти зустрічальності кожного виду - показник, який характеризує, наскільки часто певний вид рослин або тварин трапляється в досліджуваній місцевості. Розраховується як відсоток проб (наприклад, ділянок або точок спостереження), у яких був виявлений певний вид, від загальної кількості проб:

$$F = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4.1)$$

де: F – частота зустрічальності (%), n – кількість проб, у яких зафіксовано вид, N – загальна кількість проб.

Результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати флористичний аналізу досліджуваної території

Вид	Центральна частина (F, %)	Околична частина (F, %)	Перехідна зона (F, %)
<i>Rumex confertus</i>	100%	60%	20%
<i>Urtica dioica</i>	70%	80%	50%
<i>Betula pendula</i>	0%	45%	90%
<i>Salix viminalis</i>	0%	50%	85%
<i>Calamagrostis epigejos</i>	10%	75%	95%
<i>Cirsium</i>	0%	35%	80%

Аналіз отриманих результатів показав, що в центральній частині хвостосховища переважали мохи та однорічні трави, а в околицях з'являлися

вже й чагарники, такі як верба та береза. В перехідній зоні рослинний покрив був найбільш різноманітним, з домінуванням багаторічних трав та дерев.

Окрім цього, на кожній ділянці було проведено вимірювання вмісту хлорофілу в листках рослин. Це дало змогу оцінити ступінь стресу, з яким зіштовхуються рослини через токсичність середовища. Виявилось, що в центральній частині хвостосховища рівень хлорофілу був знижений (9,5 мг/г), що свідчить про високий рівень стресу у рослин. В околицях рівень хлорофілу був на середньому рівні (15,2 мг/г), а в перехідній зоні він був нормальним (21,3 мг/г), що вказує на здоровий стан рослинного покриву.

У результаті візуального оцінювання стану рослин встановлено, що в центральній частині хвостосховища спостерігається масові пошкодження листя, хлороз та некрози, що свідчить про сильне забруднення і стрес рослин. В околицях листя рослин було пожовкле, але не настільки пошкоджене, як у центральній частині. У перехідній зоні рослини мали здоровий вигляд, відсутні були явні ознаки хвороб або стресу.

Таким чином, аналіз даних показав, що на території хвостосховища спостерігається значна варіація в стані рослинного покриву залежно від зони. Центральна частина є найбільш забрудненою та деградованою, з низьким рівнем рослинного покриття та значними ознаками токсичного стресу в рослинах. В околицях процес відновлення йде повільно, а в перехідній зоні до природних екосистем спостерігається значне поліпшення стану рослинності.

4.2. Визначення основних показників фізико-хімічних властивостей поверхневого шару ґрунту хвостосховища

Абіотичні компоненти екосистеми визначають можливість існування всіх груп організмів у тому чи іншому середовищі, впливаючи на географічне поширення рослин, тварин та мікроорганізмів. Вони поєднують між собою різні групи організмів і тим забезпечують структурно-функціональну цілісність екосистем. Абіотична складова екосистеми суходолу включає фізичні та хімічні

фактори, які не мають живого походження і впливають на умови існування організмів у даному середовищі. Ці фактори включають геологічні особливості (наприклад, ґрунти, мінерали, рельєф), кліматичні умови (температура, опади, вологість, вітрові умови), наявність водних ресурсів (річки, озера, струмки, ґрунтові води), топографію (рельєф, висота над рівнем моря), а також хімічний склад середовища (поживні речовини, рН, концентрація мінералів).

Ці абіотичні фактори створюють основну структуру та функціонування екосистеми суходолу. Вони впливають на розподіл організмів, їх різноманітність та здатність пристосовуватися до середовища. Наприклад, різні типи ґрунтів та їх текстура впливають на доступність вологи та поживних речовин для рослин, що впливає на їх розташування та здатність до росту та розвитку. Кліматичні умови визначають розподіл рослинних видів та тварин, а також впливають на їх фізіологічні процеси. Водні ресурси є важливим елементом для живих організмів, а топографія впливає на формування мікроклімату та умови існування організмів.

Абіотичні фактори взаємодіють між собою, створюючи унікальні умови для розподілу та взаємодії різних видів організмів у суходільних екосистемах.

Їх спільна дія впливає на енергетичні потоки, цикли речовин, водний баланс, а також на стійкість та функціонування екосистем. [104, 105]. У наслідок діяльності ДГХП «Сірка» суттєвих змін зазнали едафічні фактори (фізико-хімічні властивості ґрунту). Решта абіотичних компонентів залишилися практично у незмінному виді і характерні для непошкоджених екосистем.

Розточчя – Головний Європейський вододіл, що розділяє річки Чорного і Балтійського морів. В процесі розробки та збагачення сірки на поверхню виносилися гірські породи, що призвело до механічного та хімічного порушення природних екосистем. Згідно попередніх досліджень сірчана руда – це вапняк з великим вмістом хімічних елементів (Cu, Zn, Cd, Pb, Fe, Mn, Sr, S), у якому є включення чистої сірки. Формування відвалів значною мірою зумовлено технологією розроблення корисних копалин, фізико-хімічними властивостями розкривних порід і ґрунтово-кліматичними умовами.

Під час добування руди покривні породи часто складувалися у відвали безсистемно, тобто третинні відклади перемішувалися із четвертинними. Як наслідок, сучасний ґрунтовий покрив родовищ є неоднорідним за своїм механічним складом та фізико-хімічними властивостями. Знання фізико-хімічних властивостей та елементного складу винесених на поверхню гірських порід є важливим також з точки зору використання відновлених територій.

Облаштування сховища відходів сірко видобувного підприємства у межах резервату «Розточчя» призвело до повного руйнування на цій території природної екосистеми. Після припинення видобутку сірки у 2006 році, на території хвостосховища проходять природні процеси відновлення. Загалом, дана територія є непридатною для функціонування екосистеми, характерної для резервату «Розточчя». Необхідним є рекультивація пошкоджених ґрунтів для повноцінного відновлення життєдіяльності на території хвостосховища [106, 107, 108].

Тому актуальним є дослідження едафічних компонентів на цій території з метою визначення основних показників фізико-хімічних властивостей поверхневого шару на території хвостосховища ліквідованого сірко видобувного підприємства (щільність, густина твердої фази, загальна пористість, вміст гумусу, актуальна кислотність, елементний склад) та встановлення його придатності до формування рослинного покриву.

У дослідженнях використовували проби породи, яка утворилася у результаті затвердіння відходів видобування сірки флотаційним методом. Для цього було вибрано територію хвостосховища сірчаного виробництва 1, розташованого на околицях с.Воля Старицька (рис.4.1). Хвостосховище оточене земляним валом. У частині хвостосховища утворилася водойма 2, решта території представляє собою пустелю 3, сформовану затверділими відходами, із фрагментами ґрунтового покриву товщиною до 5 см.

Відбір проб ґрунту проводили згідно методики, наведеної у розділі 2.. Аналіз елементного складу проводили з використанням рентгенофлуоресцентного аналізатора «EXPERT-3L» і його програмного

забезпечення. Густину ґрунту визначали термобарометричним методом. Густину твердої фази ґрунту визначали відношенням маси ґрунту до сумарного об'єму твердих частинок. Для визначення показника твердої фази ґрунту користуються пікнометричним методом, що дає змогу визначити сумарний об'єм твердих частинок ґрунту за масою води, яка витісняється цим об'ємом з пікнометра. Пористість розраховували за показниками густини ґрунту та густини твердої фази ґрунту. Визначення pH ґрунтового розчину здійснювали потенціометричним методом.

Експериментальні дослідження здійснювали на типовому для хвостосховища майданчику площею 0.6 га. Майданчик прямокутної форми розміром 120×50 м. Було відібрано 5 точкових проб вздовж діагоналей майданчика на відстані 50 м для визначення фізичних властивостей і структури ґрунту (рис.4.3). Під час відбору проб дерновий шар ґрунту попередньо видалили. Для визначення вмісту в ґрунті хімічних речовин формували одну об'єднану пробу масою 1 кг.

Для визначення густини ґрунту зразки перенесли у попередньо зважені бюкси, після чого зважили у вологому стані та сухому після їх висушування до постійної ваги за $t = 150^{\circ}\text{C}$. Висушування триває 6-8 годин. Гарячі бюкси закрили кришками та перенесли в ексикатор, заповнений хлористим кальцієм. Зважування проводили після повного охолодження. Визначали, як відношення маси ґрунту до його об'єму. Середня величина цього показника склала $1,42 \text{ кг/м}^3$. У випадку, коли густина ґрунту дорівнює $1,6-1,7 \text{ кг/м}^3$ коріння деревних порід практично в землю не проникає [60, 61]. Це пояснює відсутність дерев на досліджуваній ділянці хвостосховища.

Одночасно визначали густину твердої фази ґрунту відношенням маси ґрунту до сумарного об'єму твердих частинок. Середній показник густини твердої фази становить $2,43 \text{ кг/м}^3$. За густини твердої фази ґрунту в межах $2,5-2,7 \text{ кг/м}^3$ їх відносять до малогумусних [60, 61].

Пористість ґрунту впливає на його родючість через здатність ґрунту утримувати та передавати воду рослинам, що необхідно для їх здорового

розвитку, впливає на доступність повітря для кореневої системи рослин. Вона також визначає можливість ґрунту відводити надмірну вологу, що допомагає уникнути застою води та гниль. Оптимальна пористість сприяє зберіганню та постачанню рослинам поживних речовин.

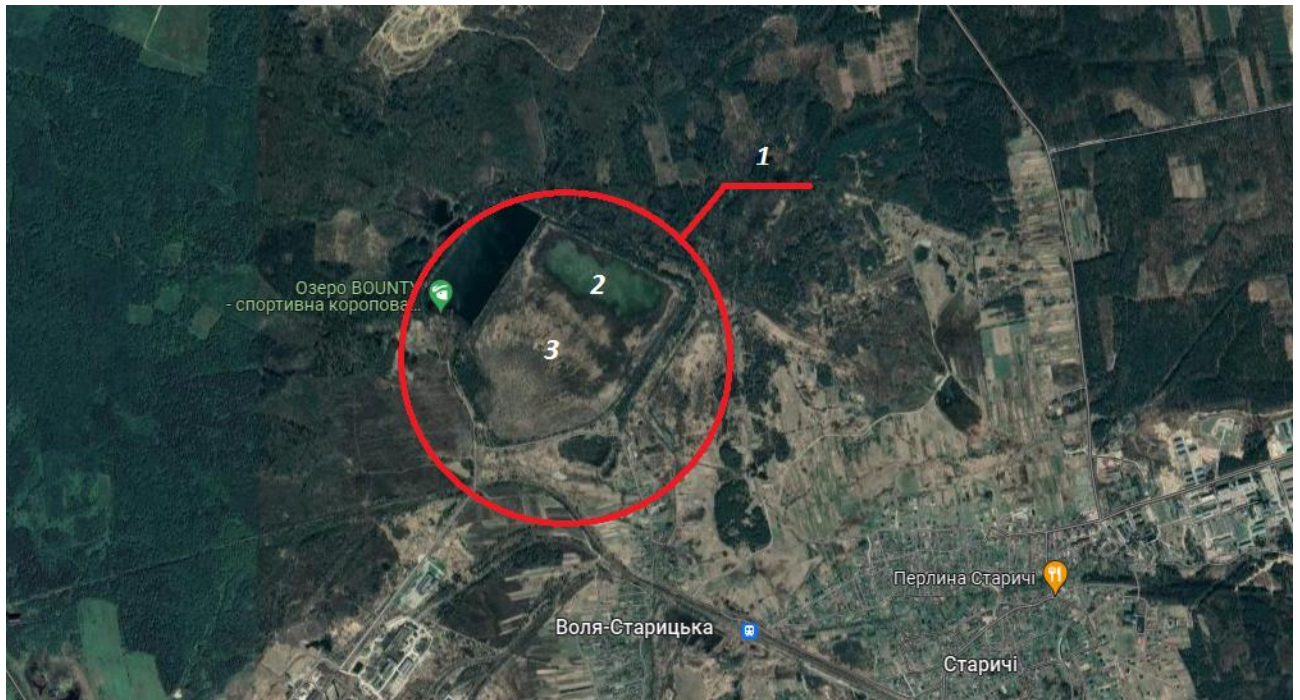


Рисунок 4.2 – Розташування хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» на околицях населеного пункту Воля Старицька:

1 – загальна територія хвостосховища, 2 – водойма, 3 – затверділі відходи виробництва

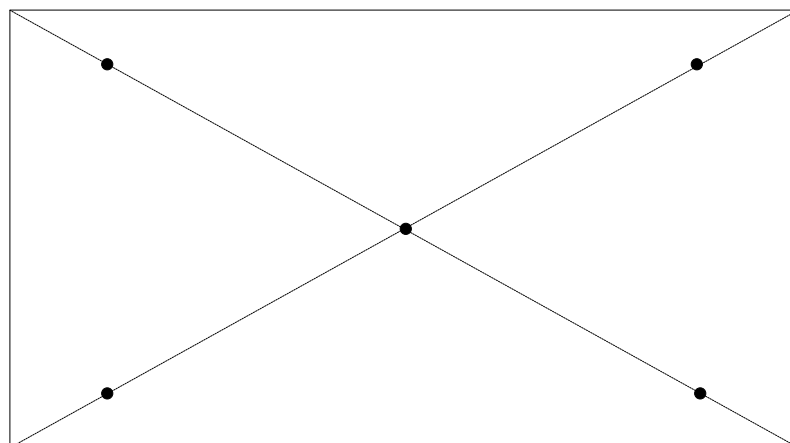


Рисунок 4.3 – Схема розташування точок відбору проб ґрунту на досліджуваному майданчику

Визначення пористості ґрунту ($V_{пор}$) виражається у відсотках від його загального об'єму в непорушеному стані. Пористість (шпаруватість) ґрунту характеризується формою та величиною пор всередині структурних відмін між ними. Встановлено, що середня пористість ґрунту на об'єкті становить 41,56 %. Для зонального типу ґрунтів задовільною у вегетаційний період вважається загальна пористість на рівні 50÷55%, а надмірно низькою – менша за 40% [64].

Кислотність ґрунту не є її морфологічною (зовнішньою) ознакою, оскільки це фізико-хімічна властивість, якої ґрунт набуває у процесі свого розвитку під впливом різноманітних факторів ґрунтоутворення. Водночас реакція ґрунтового розчину надзвичайно важлива властивість, що визначає генетичні та виробничі (у тому числі і родючість) ґрунтові властивості, а також є одним із діагностичних ознак ґрунту. Для визначення рН ґрунтового розчину готували водну витяжку. Для цього 10 г ґрунту поміщали у колбу об'ємом 250 мл та доливали 50 мл дистильованої води. Далі колбу збовтували упродовж 5 хв. Вміст колби відфільтровували через паперовий фільтр до появи прозорого фільтрату. В отриманому фільтраті кислотність визначали за допомогою цифрового рН метра Mettler Toledo SevenCompact S220-Kit. Встановлено середній показник $pH=6,5$, такі ґрунти можна віднести до груп нейтральних та слабокислих ґрунтів.

Визначення вмісту гумусу слугує одним із найважливіших параметрів оцінювання агрохімічних властивостей ґрунтів. Він дає уяву про характер впливу лісових фітоценозів на процес ґрунтоутворення. Гумус впливає на розвиток корисних властивостей ґрунту, що обумовлюють його родючість, а саме: збагачують азотом та іншими елементами кореневого живлення, покращують водно-фізичні властивості, теплові властивості, підвищують ємність і буферність ґрунтового розчину та підвищують мікробіологічну активність ґрунту. У досліджуваних взірцях ґрунту гумус не виявлений.

Практично повна відсутність гумусу у поверхневому шарі затверділих відходів на території хвостосховища дає підстави класифікувати ці ґрунти як слабо гумусові. Цю характеристику підтверджує показник густини досліджуваних взірців.

Елементний склад ґрунту - це основна хімічна характеристика ґрунту, яка необхідна для розуміння його родючості, можливостей для сільського господарства та оцінки екологічного стану даних територій. Основні елементи, що входять до складу ґрунту, включають кисень, вуглець, водень, азот, фосфор, калій, кальцій, магній, сірку та інші. Елементний склад може варіюватися в залежності від типу ґрунту, кліматичних умов, рівня геологічної активності та інших факторів. Основним типом, характерним для території діяльності сірко видобувного підприємства, є підзолисті суглинні та супіщані ґрунти. Особливістю елементного складу ґрунтів є великий діапазон концентрацій. У табл.4.3 наведено середній елементний склад (у %) метрового шару ґрунтів в перерахунку на абсолютно сухе зважування [109,110,111].

Таблиця 4.3

Середній елементний склад (у %) метрового шару ґрунтів території діяльності сірко видобувного підприємства

Елементи Ґрунти	O	H	C гумусу	N	P	Si	Al	Fe
Підзолисті:								
суглинні	49,60	0,06	0,66	0,080	0,054	34,86	6,33	3,02
супіщані	50,66	0,05	0,67	0,066	0,022	39,57	4,31	1, 16

У результаті аналізу хімічного складу ґрунту отримані результати, наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Середній елементний склад (у %) об'єднаної проби ґрунту території

хвостосховища виробництва сірки

Елемент	S	Ca	Ti	Fe	Rb	Sr	Cd	Ba
Масова частка, %	28,55	68,83	0,20	0,23	0,009	0,712	0,04	0,82

Аналіз даних таблиць показує значний антропогенний вплив на ґрунти діяльності сірковидобувного підприємства. Одним із головних показників цього впливу є різке збільшення концентрації сірки, яка у метровому шарі ґрунтів становить 0,66–0,67%, а в ґрунтах хвостосховища досягає 28,55%. Така велика кількість сірки вказує на її накопичення внаслідок промислових процесів, зокрема підземної виплавки сірки. Крім того, у хвостосховищі спостерігається високий вміст кальцію (68,83%), що, пов'язано із застосуванням вапна для нейтралізації кислот, які утворюються під час виробничих процесів.

Також у ґрунтах хвостосховища виявлено важкі метали та рідкісні елементи, такі як кадмій (0,04%), барій (0,82%), стронцій (0,712%) і рубідій (0,009%). Ці елементи відсутні в метровому шарі ґрунтів підзолистого типу, що свідчить про їхнє техногенне походження. Вони є побічними продуктами промислової діяльності та можуть становити загрозу для довкілля та здоров'я людей. Зменшення вмісту кремнію та алюмінію, які характерні для природних ґрунтів, свідчить про їхнє заміщення техногенними матеріалами.

Значущим є й той факт, що в промислово змінених ґрунтах знижується вміст органічних компонентів, таких як гумус та азот. У метровому шарі ґрунтів вони наявні в невеликих кількостях (гумус – 0,08–0,066%, азот – 0,054–0,022%), тоді як у хвостосховищі ці показники навіть не згадуються. Це свідчить про деградацію органічної складової ґрунту через вплив промислової діяльності.

Хімічний склад породи, що утворилася у досліджуваному хвостосховищі значно відрізняється від ґрунтів, характерних для резервату «Розточчя». Це є прямим наслідком технологічних процесів. Основними ознаками такого впливу є накопичення сірки, важких металів і рідкісних елементів, збільшення вмісту кальцію та зменшення органічних компонентів ґрунту.

Дослідження показали, що абіотичні компоненти екосистеми хвостосховища ліквідованого сірковидобувного підприємства мають значні відхилення від природних норм, характерних для резервату «Розточчя». Зокрема, можна відмітити, що ґрунтовий покрив хвостосховища відзначається низькою пористістю (41,56%), що перешкоджає ефективному формуванню рослинного покриву. Показники густини поверхневого шару становить 1,42 кг/м³, що унеможлиблює розвиток деревної рослинності. Практична відсутність гумусу свідчить про низький рівень родючості ґрунту. Хімічний склад поверхневих порід демонструє високу концентрацію сірки (28,55%) і кальцію (68,83%), що є наслідком діяльності сірковидобувного підприємства.

Результати досліджень вказують на необхідність проведення рекультиваційних заходів для покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту та відновлення природних екосистем. Ефективна рекультивація сприятиме поверненню біологічного різноманіття та відновленню життєдіяльності на посттехногенній території.

4.3. Оцінка біотичного потенціалу

Біотичний потенціал екосистеми визначає її здатність підтримувати стабільне біорізноманіття, регулювати природні процеси та відновлюватися після впливу зовнішніх факторів. У природних умовах цей потенціал забезпечується розгалуженими трофічними зв'язками та високою адаптивністю живих організмів. Втім, у техногенних екосистемах, що утворилися на місці промислових об'єктів, біотичний потенціал є суттєво знижений через

деградацію ґрунтів, зміну водного режиму та забруднення хімічними речовинами.

Методи оцінки біотичного потенціалу включали [112]:

- індекс різноманіття Шеннона (H) для визначення рівня біорізноманіття;
- коефіцієнт сукцесії – розрахунок рівня природного заростання.

Обчислення індексу видового різноманіття Шеннона є важливим етапом у визначенні біотичного потенціалу екосистеми. Цей індекс дозволяє кількісно оцінити різноманіття видів на певній території, враховуючи як кількість видів, так і їх пропорційне представлення.

Формула для розрахунку індексу Шеннона:

$$H' = -\sum (p_i \cdot \ln p_i) \quad (4.2)$$

де: p_i - частка кожного виду рослин у загальній кількості рослин на ділянці; $\ln p_i$ - натуральний логарифм частки виду.

Для кожної ділянки під час польового дослідження визначали кількість рослин кожного виду та їх частку у загальній кількості рослин на ділянці. Результати досліджень наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Визначення видового різноманіття на досліджуваних ділянках хвостосховища

Вид рослини	Кількість рослин		
	Центральна частина	Околиці	Перехідна зона
Вид 1 (трав'яний)	10	30	20
Вид 2 (трав'яний)	5	20	15
Вид 3 (чагарник)	-	10	10
Вид 4 (трав'яний)	3	-	-
Вид 5 (чагарник)	-	5	5
Вид 6 (дерево)	-	5	5

Інші види	6	10	10
Σ кількість рослин	24	80	55
індекс Шеннона	1,28	2,15	2,80

Таким чином, за допомогою розрахунку індексу Шеннона можна оцінити рівень видового різноманіття на кожній із зон. Центральна частина має низьке видове різноманіття через високе забруднення, в той час як околиці та перехідна зона мають значно вищий рівень біорізноманіття, що свідчить про більшу здатність до відновлення екосистеми.

Далі визначали коефіцієнт сукцесії (також відомий як індекс сукцесії) — це показник, який відображає ступінь розвитку екосистеми чи біоценозу в процесі сукцесії, тобто в процесі зміни структури і складу рослинного і тваринного покриву з часом.

Коефіцієнт сукцесії зазвичай виражає швидкість або напрямок змін у складі видів, часто це один із показників стабільності екосистеми. Розрахунок проводили за формулою:

$$K = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} \quad (4.3)$$

де: H_1 - індекс різноманіття на початковому етапі, H_2 - індекс різноманіття на більш пізньому етапі сукцесії (через більше років), T_1 - час на початковому етапі, T_2 - час на пізньому етапі сукцесії.

Така формула дає уявлення про швидкість змін у різноманітті видів і, відповідно, вказує на коефіцієнт сукцесії, що дозволяє оцінити процес розвитку екосистеми.

На момент закриття виробництва сірки у 2006 році територія хвотсосховища характеризувалася повною відсутністю рослин. Тоді для центральної частини хвостосховища за умови, що індекс Шеннона в центральній частині приймається рівним 0, а час між етапами сукцесії складає 15 років, то

коефіцієнт сукцесії становить 0,19. Значення коефіцієнту сукцесії в межах до 0,20 свідчить про повільний процес природного відновлення.

Висновки до розділу 4

1. Аналіз результатів проведених експериментальних досліджень вказує на значну нерівномірність рослинного покриву території хвостосховища. За цією ознакою територію хвостосховища можна поділити на три умовні зони: центральна, перехідна та околиці. Центральна частина є найбільш забрудненою та деградованою, з низьким рівнем рослинного покриття та значними ознаками токсичного стресу у рослин. В околицях процес відновлення йде повільно, а в перехідній зоні до природних екосистем спостерігається значне поліпшення стану рослинності.

2. Ґрунтовий покрив хвостосховища відзначається низькою пористістю (41,56%), що перешкоджає ефективному формуванню рослинного покриву. Показники густини поверхневого шару становить 1,42 кг/м³, що унеможливорює розвиток деревної рослинності. Практична відсутність гумусу свідчить про низький рівень родючості ґрунту. Хімічний склад поверхневих порід демонструє високу концентрацію сірки (28,55%) і кальцію (68,83%). Це все вказує на значні відхилення від стану природних екосистем, характерних для резервату «Розточчя».

3. Вимірювання рівня хлорофілу в рослинах, оцінка видової різноманітності за індексом Шеннона показали, що центральна частина хвостосховища має найнижчі показники біотичного потенціалу самовідновлення.

4. Проведені дослідження вказують, що природного самовідновлення недостатньо для повної реабілітації екосистеми, тому необхідне проведення активних рекультиваційних заходів, таких як покращення ґрунтового складу, висадка стійких до токсичних речовин рослин та створення сприятливих умов для відновлення біорізноманіття.

РОЗДІЛ 5

ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОСИСТЕМИ ХВОСТОСХОВИЩА ЯВОРІВСЬКОГО ДГХП «СІРКА»

Як було неодноразово показано у ході проведених досліджень, хвостосховище Яворівського державного гірничо-хімічного підприємства «Сірка» є однією з найбільших техногенно змінених територій в Україні, що зазнала значного антропогенного впливу внаслідок видобутку та переробки сірки. Відновлення цієї екосистеми має стратегічне значення для регіону та країни загалом, оскільки хвостосховище є джерелом забруднення ґрунтів, води та повітря, а також чинником деградації природних ландшафтів.

Важливість відновлення екосистеми хвостосховища полягає у кількох ключових аспектах. По-перше, екологічна безпека регіону залежить від ефективності рекультиваційних заходів, оскільки токсичні речовини, що містяться у відходах виробництва сірки, можуть проникати у водоносні горизонти та ґрунти, погіршуючи якість навколишнього середовища. По-друге, біологічне відновлення дозволить поступово повернути територію до природного стану, що сприятиме відновленню біорізноманіття та покращенню якості ґрунтового покриву. По-третє, рекультивовані землі можуть бути використані для сільського або лісового господарства, рекреаційних зон або інших екологічно безпечних видів діяльності.

Правовий статус відновлення хвостосховища регулюється низкою законодавчих актів України у сфері охорони довкілля. У контексті хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» це означає, що будь-які заходи з відновлення повинні відповідати державним екологічним нормам і стандартам щодо поводження з токсичними відходами.

Окрім національних норм, Україна має зобов'язання перед Європейським Союзом у сфері охорони довкілля, оскільки отримала статус кандидата на вступ до ЄС.

Таким чином, відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» є необхідним як з екологічного, так і з правового аспекту життєдіяльності суспільства.

5.1. Законодавство України та ЄС з питань рекультивації пошкоджених територій

Відповідно до положень Національної доповіді «Цілі Сталого Розвитку: Україна» завданням 15.3. є «Відновити деградовані землі та ґрунти з використанням інноваційних технологій». Одним із трьох індикаторів виконання даного завдання є «Кількість визначених та реалізованих завдань щодо досягнення нейтрального рівня деградації земель, одиниць» [113]. Важливість даної доповіді як орієнтиру розвитку України до 2030 року закріплено в Указі Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» № 722/2019 від 30 вересня 2019 року [114].

Законодавча база України щодо рекультивації пошкоджених територій спрямована на забезпечення екологічної безпеки, відновлення деградованих земель та їх повернення до продуктивного використання. Ця сфера регулюється низкою законодавчих актів, серед яких Земельний кодекс України, Кодекс України про надра, закони "Про охорону навколишнього природного середовища", "Про відходи", "Про оцінку впливу на довкілля", а також підзаконні акти та міжнародні зобов'язання України у сфері екології.

Земельний кодекс України визначає необхідність рекультивації порушених земель, зокрема тих, що зазнали негативного впливу через промислову діяльність, і встановлює обов'язок землекористувачів відновлювати порушені ділянки для подальшого використання у сільському або лісовому господарстві. Кодекс України про надра вимагає, щоб підприємства, що здійснюють видобуток корисних копалин, після завершення діяльності виконували заходи з відновлення територій та мінімізації негативного впливу

на довкілля. Закон "Про охорону навколишнього природного середовища" закріплює загальні принципи екологічної політики та встановлює зобов'язання щодо відновлення порушених екосистем. Він також передбачає необхідність екологічної експертизи для проектів рекультивації, що дозволяє оцінити потенційні наслідки для навколишнього середовища та визначити оптимальні підходи до відновлення територій.

Закон України "Про відходи" регулює питання поводження з промисловими відходами та передбачає обов'язок підприємств здійснювати рекультивацію територій, забруднених небезпечними речовинами. Важливе значення має також Закон "Про оцінку впливу на довкілля", який встановлює обов'язкову процедуру оцінки екологічних наслідків господарської діяльності, що впливає на стан земель. Цей закон забезпечує прозорість процесу рекультивації та дає можливість громадськості брати участь у контролі за реалізацією екологічних заходів.

Практичне виконання рекультиваційних заходів регламентується також підзаконними актами, зокрема методичними рекомендаціями Міністерства екології та природних ресурсів України, які визначають порядок виконання рекультиваційних робіт, включаючи їх технічний та біологічний етапи. Технічний етап передбачає роботи з відновлення рельєфу, усунення небезпечних відходів та покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту. Біологічний етап передбачає висадку рослин, сприяння відновленню природних екосистем і забезпечення умов для сталого розвитку рекультивованої території.

Україна, маючи статус кандидата на вступ до Європейського Союзу, зобов'язана гармонізувати своє екологічне законодавство відповідно до європейських директив. Зокрема, Директива 2004/35/ЄС про відповідальність за шкоду, завдану довкіллю, встановлює принцип "забруднювач платить", згідно з яким підприємства, що завдали шкоди довкіллю, зобов'язані усувати її за власний кошт. Рамкова директива 2008/98/ЄС про відходи передбачає заходи щодо мінімізації утворення промислових відходів і відновлення забруднених

територій. Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди вимагає контролю за рівнем забруднення довкілля та обов'язкового впровадження заходів для зниження негативного впливу на екосистеми.

Попри наявність законодавчих норм, в Україні існують проблеми з практичною реалізацією рекультиваційних заходів. Основні труднощі пов'язані з недостатнім контролем за виконанням екологічних зобов'язань підприємствами, відсутністю ефективного механізму фінансування рекультивації та недостатнім рівнем інтеграції європейських стандартів у національне законодавство. У багатьох випадках підприємства, що здійснюють видобуток корисних копалин, після завершення діяльності уникають обов'язку відновлення територій, що призводить до значного екологічного навантаження.

Перспективи вдосконалення законодавства включають посилення державного контролю за виконанням екологічних заходів, створення економічних механізмів стимулювання рекультивації, а також впровадження сучасних підходів до екологічного моніторингу. Гармонізація з європейськими нормами та впровадження принципу "забруднювач платить" дозволить підвищити ефективність відновлення пошкоджених територій, сприятиме збереженню біорізноманіття та забезпеченню екологічної безпеки.

Курс на європейську інтеграцію є логічним наслідком здобуття Україною незалежності. Його мета – створити умови для входження до спільноти розвинених європейських країн шляхом масштабних внутрішніх перетворень. Після Революції Гідності у 2014 році Україна підписала основний стратегічний документ – Угоду про асоціацію, яка визначає відносини між Україною та Європейським Союзом.

Угода про асоціацію почала частково застосовуватися з 2014 року, а її повна імплементація відбулася 1 вересня 2017 року. Зростаюча підтримка європейської інтеграції з боку українських громадян знайшла відображення в Конституції України. У лютому 2019 року досягнення повноправного членства

України в ЄС було закріплено в Конституції України як стратегічний курс держави.

У період з 2014 року до початку 2022 року Україна виконала Угоду про асоціацію на 63%: частково впровадила законодавство ЄС відповідно до Угоди про асоціацію, провела низку євроінтеграційних змін у майже всіх сферах суспільного, політичного та економічного життя, приєдналася до низки ключових програм ЄС, активізувала участь у макрорегіональних стратегіях і транскордонних програмах ЄС.

23 червня 2022 року Європейська рада ухвалила історичне рішення про надання Україні статусу кандидата на вступ до ЄС. З цього моменту розпочався новий етап європейської інтеграції України (Комунікаційна команда з інтеграції, 2024). Протягом років реалізації Угоди була сформована правова база та механізми для впровадження європейських норм у політику України щодо охорони довкілля.

В Україні імплементація законодавства ЄС у сфері охорони довкілля відбувається в межах восьми секторів, що регулюються 29 джерелами права – директивами та регламентами ЄС, які встановлюють загальні правила та стандарти, що мають бути запроваджені у національне законодавство (Управління відходами та ресурсами, 2014).

Рекультивация земель у країнах Європейського Союзу є важливим аспектом екологічної політики, спрямованим на відновлення територій, які зазнали негативного впливу внаслідок промислової, сільськогосподарської або іншої господарської діяльності. Відновлення порушених земель є не лише екологічною необхідністю, а й економічною доцільністю, оскільки сприяє покращенню стану довкілля, збереженню природних ресурсів і забезпеченню сталого розвитку. Законодавство ЄС у цій сфері базується на низці директив і регламентів, які визначають загальні принципи та обов'язки держав-членів щодо охорони і відновлення земельних ресурсів.

Одним із ключових документів є Директива 2004/35/ЄС про екологічну відповідальність, що закріплює принцип "забруднювач платить". Це означає, що підприємства, діяльність яких спричинила деградацію земель або забруднення довкілля, несуть відповідальність за їх відновлення. Директива встановлює механізми контролю, оцінки ризиків і компенсаційних заходів, що мають бути реалізовані у випадках екологічної шкоди. Вона також передбачає зобов'язання щодо запобігання подальшому забрудненню та відновлення екосистем у разі їхнього порушення.

Директива 1999/31/ЄС регулює поводження з відходами та рекультивацію полігонів після завершення їх експлуатації. Вона містить вимоги до відновлення територій, що використовувалися для захоронення відходів, передбачає заходи з очищення ґрунтів, моніторингу рівня забруднення та відновлення природного середовища. Окрім цього, директива запроваджує суворі екологічні норми для полігонів твердих побутових відходів, які мають на меті зменшення забруднення підземних вод та викидів метану в атмосферу.

Також важливу роль відіграє Директива 2008/98/ЄС, яка встановлює загальні принципи поводження з відходами та передбачає заходи для відновлення деградованих земельних ділянок. Вона закликає країни ЄС впроваджувати системи циркулярної економіки, де значна увага приділяється повторному використанню та утилізації відходів, що сприяє зменшенню антропогенного впливу на довкілля.

Стратегія ЄС щодо ґрунтів передбачає комплексний підхід до збереження родючості та екологічного стану земель, а також сприяє розвитку національних програм із рекультивації. Вона спрямована на запобігання ерозії, виснаженню ґрунтів і втраті біорізноманіття, що є важливими складовими екологічної безпеки. У рамках цієї стратегії особлива увага приділяється збереженню лісових насаджень, болотних екосистем і природних ландшафтів, які відіграють значну роль у балансуванні екологічних процесів.

В Україні процес гармонізації законодавства з європейськими стандартами відбувається в рамках Угоди про асоціацію між Україною та ЄС. Національне законодавство у сфері рекультивації земель поступово адаптується до вимог ЄС. Зокрема, Земельний кодекс України та Закон "Про охорону земель" містять положення, які визначають обов'язки землекористувачів щодо відновлення порушених земель. Водночас Закон "Про оцінку впливу на довкілля" передбачає екологічну експертизу діяльності, що може спричинити деградацію ґрунтів, і таким чином відповідає Директиві 2011/92/ЄС.

Українське законодавство також імплементує принцип "забруднювач платить", що закріплений у законі "Про відходи". Це зобов'язує підприємства проводити рекультивацію земель після завершення господарської діяльності та відповідати за завдану шкоду. Крім того, державні будівельні норми містять положення, що регламентують відновлення територій після будівельних і промислових робіт, узгоджуючись із європейськими стандартами. Особливу увагу приділено контролю за поводженням із небезпечними відходами та токсичними речовинами, які можуть негативно впливати на екосистеми та здоров'я людей.

Важливим кроком у цьому напрямку є співпраця України з ЄС у сфері моніторингу ґрунтів, впровадження екологічних програм і створення механізмів державного контролю за рекультивацією. У рамках міжнародних ініціатив здійснюються дослідження стану земельних ресурсів, оцінка рівня забруднення та розробка заходів щодо їхнього відновлення. Незважаючи на значний прогрес, повна гармонізація потребує подальшого вдосконалення правової бази, зокрема створення комплексної стратегії збереження земельних ресурсів, що враховувала б найкращі практики Європейського Союзу. Завдяки цьому Україна зможе забезпечити ефективне відновлення деградованих територій, сприяти збереженню природного середовища для майбутніх поколінь і розвивати сталу екологічну політику, яка відповідатиме міжнародним стандартам.

Пріоритетною метою тут є перетворення відходів на ресурси та зменшення їх утворення. Національне законодавство в цій сфері, попри досить розвинену правову базу, не повністю або лише частково відповідає вимогам ЄС. Реалізація цих директив пов'язана з суттєвими змінами та доповненнями в правовому полі. Перш за все, Україна стикається з необхідністю переходу до нової концептуальної основи, в рамках якої пріоритетні цілі управління відходами забезпечать рух до "циклічної" економіки з каскадним використанням ресурсів та мінімізацією обсягів залишкової продукції [115].

5.2. Обґрунтування первинного складу продуцентів для відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка»

Хвостосховище Яворівського державного гірничо-хімічного підприємства (ДГХП) «Сірка» характеризується низькою біологічною активністю, високою кислотністю ґрунтів, токсичними речовинами (включаючи важкі метали) і дефіцитом органічної речовини. З огляду на ці екологічні проблеми, важливим завданням є відновлення функціональної екосистеми хвостосховища за допомогою підбору відповідних первинних продуцентів – рослин, здатних успішно адаптуватися до екстремальних умов та сприяти стабілізації екосистеми.

Первинний склад продуцентів у відновлюваній екосистемі формується з піонерних рослин, які першими заселяють порушені екотопи. На початкових етапах ключову роль відіграють екстремофіли, які формують рослинність класів *Sedo-Scleranthetetea* та *Koelerio-Corynephoretea*. Основними видами є *Sedum*, *Thymus*, а також представники родини *Caryophyllaceae*. Вони стають першими вищими рослинами, які ефективно закріплюють ґрунт і створюють умови для подальших стадій сукцесії.

Вони є першими організмами, що колонізують відкриті субстрати, проте їх розвиток дуже повільний і стає помітним лише через кілька років. Такі

мікроорганізми домінують у разі відсутності щільного рослинного покриву, а до основних родів належать *Chlorococcum*, *Nostoc*, *Scytonema*, *Trebouxia*, *Trentepohlia*. У більш сухих та ізольованих умовах з'являються лишайники, серед яких переважають накипні форми (*Xanthoparmelia*, *Aspicilia*, *Pertusaria*), що разом із мохами формують мохово-лишайникові угруповання.

Згодом формується суцільний покрив злаковників, який поступово витісняє менш конкурентоспроможні види. Прикладами таких рослин є пирій повзучий (*Elymus repens*) та осока шерстиста (*Carex hirta*), що мають високий потенціал для тератрансформації [116]. Поява пирію повзучого (*Elytrigia repens*), мати-й-мачухи (*Tussilago farfara*) та осоки шерстковолоостої (*Carex hirta*) є важливим етапом переходу до більш розвинених рослинних угруповань.

У процесі сукцесії злакові фітоценози змінюються на дворічні трав'янисті рослини, які мають довший вегетаційний цикл і кращі можливості для генерації насіння. Це призводить до поступового формування перехідного високотрав'я, яке, своєю чергою, змінюється чагарниковими угрупованнями. Якщо в ґрунті наявний банк насіння деревних порід, екосистема швидко переходить до стадії молодих лісових угруповань.

Кінцевим етапом сукцесії є формування корінних перестійних лісів, однак навіть у клімакських лісових екосистемах тривають динамічні процеси. Відмирання окремих дерев призводить до локальних змін у складі підросту та трав'яного покриву, створюючи умови для подальшої трансформації екосистеми [117].

На темпи та напрямки відновлення рослинності впливають численні фактори. Серед них – кліматичні умови, сонячна активність, тектонічні процеси, а також біотичні чинники, такі як поширення інвазійних видів-трансформерів, що можуть значно сповільнити сукцесійні процеси або навіть призвести до формування нестійких ценозів. Важливу роль відіграє і антропогенний вплив: гірничодобувна діяльність, зміни у використанні земель,

а також відновлювальні заходи, які не завжди враховують складні екологічні взаємодії.

Таким чином, первинний склад продуцентів у відновлюваній екосистемі визначає подальший розвиток рослинного покриву. Початкове заселення екстремофільними видами створює умови для наступних стадій сукцесії, що веде до формування стабільних лісових екосистем [118,119]. Водночас ці процеси залишаються динамічними і залежать як від природних, так і від антропогенних факторів. Водночас, первинний склад продуцентів відновлювальної екосистеми визначається її типом і умовами середовища. Зазвичай до них належать рослини, які здатні перетворювати сонячне світло на органічні речовини через фотосинтез. Це можуть бути різноманітні види трав, кущів, дерева або навіть мікроскопічні водорості в водних екосистемах.

Важливо, що ці продуценти утримують і перетворюють енергію, що відкриває шлях для інших організмів у системі. Вони також забезпечують живлення для консументів у вигляді травоїдних тварин або навіть безпосередньо для травоїдних людей [120,121,122,123].

Відновлення рослинності на техногенно порушених територіях є критичним екологічним завданням, особливо для таких об'єктів, як хвостосховище Яворівського ДГХП «Сірка». Забруднення важкими металами, висока кислотність ґрунтів та низька біологічна активність ускладнюють природну сукцесію, що вимагає розробки ефективних методів рекультивації. Подальші дослідження необхідні для вдосконалення біотехнологічних підходів, таких як використання стійких рослин, мікоризоутворюючих грибів і біоінженерних рішень, що сприятимуть відновленню екологічної рівноваги [124,125,126,127].

Для обґрунтованого вибору первинних продуцентів проводили оцінку екологічних умов хвостосховища. Територія хвостосховища характеризується рядом негативних екологічних факторів, що обумовлені залишками сульфатів та сірки. Вони спричиняють підвищену кислотність, що є перешкодою для

росту більшості видів рослин. Також характерним є накопичення солей і токсичних речовин, таких як важкі метали, що призводить до забруднення ґрунтів. Відсутність органічної речовини у ґрунтах хвостосховища призвела до їх низької родючості. Такі ґрунти не здатні підтримувати стійку рослинність [128].

Вибір первинних продуцентів для відновлення екосистеми здійснювали із врахуванням специфіки техногенно порушених територій хвостосховища. Важливим було обрати такі види рослин, які здатні витримувати екстремальні умови. Першочергово до складу продуцентів обирали види, що відповідали наступним критеріям:

- Мають здатність виживати при низькому рН ґрунту.
- Сприяють накопиченню органічної речовини і покращенню структури ґрунтів.
- Мають стійкість до забруднень важкими металами та засоленням.
- Мають здатність до біоремедіації та азотфіксації.
- Сприяють формуванню стабільного рослинного покриву, що забезпечує захист від ерозії та підтримує гідрологічний режим.

Для ефективного відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» визначили склад первинних продуцентів як комбінацію трав'янистих, чагарникових та деревних видів. До них увійшли трав'янисті рослини (піонерні види):

- Щучник дернистий (*Deschampsia caespitosa*) – цей вид має високу стійкість до кислотних ґрунтів і забруднень важкими металами. Його щільний дерновий покрив сприяє стабілізації ґрунту та утриманню вологи.
- Костриця червона (*Festuca rubra*) – цей вид добре адаптований до бідних ґрунтів, допомагає у стабілізації ґрунту та сприяє накопиченню органічних речовин.

- Мітлиця тонка (*Agrostis tenuis*) – зокрема, цей вид пристосований до засолених ґрунтів, що дозволяє йому бути корисним для відновлення сильно забруднених територій.
- Лядвенець рогатий (*Lotus corniculatus*) – бобова рослина, яка здатна фіксувати азот, збагачуючи ґрунт азотом та покращуючи його родючість.
- Конюшина біла (*Trifolium repens*) – також є потужним азотфіксатором, що підвищує біологічну активність ґрунтів і забезпечує поживні речовини для наступних поколінь рослин.

А також чагарникові та деревні види:

- Верба біла (*Salix alba*) – одна з найбільш стійких до кислотних і засолених ґрунтів рослин, добре укріплює ґрунт, запобігаючи ерозії, а також має високу здатність до біоре mediaції.
- Береза повисла (*Betula pendula*) – бере участь у формуванні гумусу, допомагає поліпшити структуру ґрунту і витримує важкі умови.
- Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) – цей вид здатний витримувати кислі ґрунти та є важливим для формування стійкої лісової екосистеми на техногенно порушених землях.
- Обліпіха крушиновидна (*Hipporhae rhamnoides*) – здатна до азотфіксації, поліпшує структуру ґрунту та має високу стійкість до забруднень, що робить її ідеальним кандидатом для таких екосистем.

Особливу роль у процесі рекультивації відіграють рослини-фітормедіатори, які можуть очищати ґрунти від важких металів і токсичних речовин. До таких видів належать верба біла (*Salix alba*), костриця червона (*Festuca rubra*), мітлиця тонка (*Agrostis tenuis*) і лядвенець рогатий (*Lotus corniculatus*). Вони здатні не лише закріплювати ерозійно нестабільні ґрунти, а й сприяти їх поступовому відновленню.

Важливим аспектом ефективного відновлення є забезпечення балансу між природними та антропогенними факторами. Дослідження показують, що природна сукцесія може бути значно пришвидшена за допомогою

біотехнологічних методів, таких як використання мікоризоутворюючих грибів, біоінженерних технологій та спрямованого введення стійких до екстремальних умов видів рослин [129, 130].

Головною умовою ефективного відновлення є адаптація заходів рекультивації до конкретних екологічних умов. Використання локальних видів рослин, що пристосовані до специфічного середовища, дозволяє підвищити стійкість екосистеми до змін і забезпечити її довготривале функціонування.

5.3. Технологічні аспекти відновлення екосистеми хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка»

Хвостосховища є одними з найбільш проблемних техногенних об'єктів у гірничодобувній промисловості, оскільки вони містять значну кількість токсичних речовин, важких металів і шкідливих сполук. Територія хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка» – це деградована екосистема, яка потребує термінових заходів з відновлення. Хвостосховище є джерелом забруднення ґрунтів, поверхневих та підземних вод, що може мати негативний вплив на екосистеми та здоров'я населення. Рекультивація дасть змогу мінімізувати ризики розповсюдження шкідливих речовин через пил, стік та ерозійні процеси. Висаджування рослин та відновлення природних ландшафтів сприяє поверненню флори і фауни. А також – рекультивовані території можуть бути використані для сільського господарства, лісонасаджень або рекреаційних зон.

На основі проведених екосистемних досліджень території хвостосховища, вивчення стану рослинності, умов ґрунтового середовища та оцінювання біотичного потенціалу було запропоновано проводити рекультивацію за таким алгоритмом:

Етап 1: Геотехнічна підготовка:

- облаштування дороги через дамбу хвостосховища для можливості проїзду інженерної техніки до місця проведення робіт;
- вирівнювання поверхні та засипання провалів;
- формування каналів під висаджування дерев.

Етап 2. Формування рекультиваційного шару:

- покриття поверхні родючим шаром ґрунту;
- біологічна ремедіація за допомогою бактерій і грибів, що сприяють приживленню рослин та їх ефективному росту.

Етап 3: Посів трав'янистих рослин:

- висівання піонерних видів для стабілізації ґрунту та покращення водоутримуючих властивостей ґрунту.

Етап 4: Висаджування дерев.

Етап 5: Моніторинг і коригування заходів.

Запропонована методика була застосована під час проведення рекультивації частини хвостосховища виробництва сірки флотаційним методом ліквідованого Яворівського ДГХП «Сірка» в межах Міжнародної кліматичної ініціативи (ІКІ) за підтримки Федерального міністерства довкілля, збереження природи та ядерної безпеки Німеччини (BMU) на основі рішення, прийнятого Бундестагом Німеччини. Проект впроваджений Фондом Міхаеля Зуккова та Університетом сталого розвитку м. Еберсвальде з Німеччини разом з місцевою НГО «Природа Розточчя», а також Кафедрою цивільної безпеки, Інститутом сталого розвитку, НУ «Львівська політехніка».

5.3.1. Геотехнічна підготовка поверхні хвостосховища

Облаштування дороги через дамбу хвостосховища є необхідним для забезпечення безперешкодного проїзду інженерної техніки до місця проведення робіт. Це важливо для оперативного транспортування будівельних машин, матеріалів та персоналу, що займається виконанням завдань. Наявність якісного

дорожнього покриття підвищує безпеку пересування, зменшує ризик аварійних ситуацій і забезпечує стабільність конструкції дамби. Крім того, правильно облаштована дорога допомагає мінімізувати негативний вплив на довкілля, запобігаючи ерозії ґрунту та можливому забрудненню водою. Вона також сприяє ефективному виконанню робіт без зайвих затримок, що особливо важливо при реалізації проєктів у важкодоступних або технічно складних умовах. На рис.5.1 зображено світлини виконання робіт із облаштування під'їзної дороги через дамбу хвостосховища.



а)

б)

Рисунок 5.1. - Облаштування дороги через дамбу хвостосховища для можливості проїзду інженерної техніки до місця проведення робіт:
а – початкова стадія роботи техніки, б – проїзд інженерної техніки

Далі проводили вирівнювання поверхні, закріплення укосів відвалів та засипання провалів, що спрямоване на запобігання ерозії та зсувам, оскільки укріплення схилів дозволяє зменшити ризик сповзання порід під впливом

атмосферних опадів і вітру. Вирівнювання поверхні сприяє рівномірному розподілу води, що запобігає її застою та розвитку заболочення. Також це забезпечує оптимальні умови для нанесення рекультиваційного шару ґрунту, який краще закріплюється на стабільному рельєфі, покращуючи агротехнічні властивості та сприяючи росту рослин.

Водночас засипання провалів та вирівнювання території знижують ризик просідань і підвищують безпеку місцевості, запобігаючи утворенню карстових процесів. Це важливо не лише для екологічної стабільності, а й для безпечного використання території у майбутньому. Рослинність краще розвивається на вирівняних, стабільних поверхнях, що забезпечує швидше відновлення природного середовища. Результати проведеної роботи представлені на рис.5.2.



Рисунок 5.2. – Результати вирівнювання поверхні та засипання провалів частини території хвостосховища

Приведені раніше результати досліджень показали практичну відсутність ґрунтового покриття, що викликало необхідність покриття поверхні родючим шаром ґрунту. Згідно [131] товщина ґрунтового шару для успішного укорінення та розвитку дерев складає:

- мінімальна товщина – 50–60 см, цього достатньо для розвитку кореневої системи невибагливих дерев (береза, верба, акація).
- оптимальна товщина – 80–100 см, що забезпечує хороші умови для росту більшості дерев, включаючи дуб, сосну, ясен.

Нанесення шару родючого ґрунту необхідної товщини по усій площі території рекультивації було не доцільно. З метою зниження затрат було проведено формування каналів під висаджування дерев глибиною 0,6 м (рис.5.3).



Рисунок 5.3. – Облаштування заглибин для створення необхідної товщини шару ґрунту у місці висаджування дерев

5.3.2. Формування рекультиваційного шару

З метою покриття поверхні родючим шаром використовували ґрунт з неущкоджених прилеглих територій. Було створено загальний ґрунтовий покрив товщиною 20 см оптимальний для трав'янистих рослин [131]. Тоді

товщина родючого шару у місці висаджування дерев дорівнювала 80 см (рис.5.4).



5.4.- Покриття поверхні рекультивації родючим шаром ґрунту

З метою приживлення рослин та їх ефективного росту та плодоношення за умови засипки порушених територій шаром родючого ґрунту, використовували інокуляції рослин бактеріальними препаратами. Такі препарати містять специфічні штами мікроорганізмів, які взаємодіють із рослиною, сприяючи засвоєнню поживних речовин, зокрема азоту, фосфору та інших елементів. Інокуляцію рослин бактеріальними препаратами проводили методом внесення у ґрунт з поливною водою. Для цього використовували суміші: «Міковітал» – 3 частини (діючий агент *Vitasergia svidasoma* Oliferchuk IMB F -100106), «Планриз – Біо» – 10 частин (діючий агент *Pseudomonas fluorescens*), «Азотфіксатор» – 30 частин (діючий агент *Bradyrhizobium japonicum*), «Флорабацилін» – 10 частин (діючий агент *Bacillus subtilis*), Молочна сироватка – 10 частин (діючий агент лактобактерії), Добриво «Агроболік універсал» – 3 частини (використовується, як коректор дефіциту мікроелементів у рослин, як стимулятор їх інтенсивного росту і розвитку, як підсилювач імунітету. Містить екстракт гуматів з леонардиту (високо-

окисленого виду бурого вугілля), гумати з океанських бурих водоростей і комплекс мікроелементів природнього походження в легкодоступній для рослин формі. У складі переважають біологічно-активні компоненти: гумінові і фульвові кислоти, які підвищують концентрацію гумусу і родючість ґрунту), добриво «Бор Агроболік» – 3 частини (такий же склад як в добриві «Агроболік універсал» плюс молібден і бор) [130].

5.3.3. Висівання трав'янистих рослин

Висівання трав'янистих рослин проводили з метою закріплення ґрунту, запобігання ерозії та створення сприятливих умов для відновлення родючого шару. Трави швидко формують кореневу систему, що сприяє зміцненню поверхні та зменшенню змивання або вивітрювання ґрунту. Вони також покращують структуру ґрунту, підвищують його водоутримуючу здатність і сприяють накопиченню органічної речовини.

Крім того, трав'янисті рослини виконують фітомеліоративну функцію, адсорбуючи важкі метали та інші забруднювачі, що сприяє очищенню території. Їх висівання створює умови для поступового формування стабільних біоценозів та подальшого відновлення екосистеми, включаючи можливість висадки деревних і чагарникових порід на наступних етапах рекультивації.

Перші сходи з'явилися через 14 днів після висіву, а далі проходило первинне укорінення і зміцнення рослин (рис.5.5).



Рисунок 5.5.- Проростання трав'янистих рослин на території рекультивації

5.3.4. Висаджування дерев

Висаджування дерев на території хвостосховища був завершальним етапом рекультивації, спрямованим на створення стійких зелених насаджень. Дереву виконують важливу роль у стабілізації ґрунту, запобігають ерозійним процесам, покращують мікроклімат та сприяють відновленню біорізноманіття.

Важливими заходами для зниження ризику лісових пожеж на рекультивованих територіях є застосування протипожежних куліс. Протипожежні куліси – це вузькі смуги листяних дерев (наприклад, берези, осики, липи), висаджені серед хвойних насаджень або навколо територій із підвищеною пожежною небезпекою. Листяні дерева, зокрема береза, мають високу вологість і меншу схильність до займання порівняно з хвойними породами. Вони ефективно сповільнюють поширення вогню, оскільки їх листя та кора містять мало смолистих речовин. Створення протипожежних куліс із листяних порід між хвойними насадженнями зменшує ймовірність виникнення та поширення пожежі.

Дереву висаджували за стрічковою (рядова) схемою – рядами з певними інтервалами. Відстань між рядами – 4 м, між деревами в ряду – 1,2 м. Розмір рекультивованої ділянки склав 120×50м. Було сформовано 10 рядів дерев,

густина посадки склала приблизно 2,0 тис. шт./га. Загальна кількість саджанців 1000 шт. Для формування протипожежних куліс по чергово було висаджено 6 рядів сосни і 4 ряди – береза. Як посадковий матеріал використовувати дворічні саджанці сосни і берези (рис.5.6).

5.3.5. Догляд за рослинами та моніторинг екологічного стану рекультивованої території

Після завершення рекультивації території важливим етапом є догляд за висадженими рослинами та постійний екологічний моніторинг, що дозволяє оцінити ефективність відновлення екосистеми та вчасно виявити можливі проблеми.



Рисунок 5.6. – Ряд сосни на рекультивованій території

Догляд за рослинами включає регулярний полив, особливо на початкових етапах укорінення, прополку бур'янів, які можуть конкурувати за ресурси, та підживлення ґрунту добривами, що сприяє швидшому розвитку рослинності. У випадку деревних насаджень важливо забезпечити формуючу обрізку, яка стимулює здоровий ріст, а також здійснювати захист від шкідників і хвороб шляхом біологічних або агротехнічних методів.

Екологічний моніторинг включає оцінку ґрунтового покриву, визначення його хімічного складу, вологості та рівня забруднення важкими металами або іншими токсичними елементами. Також слід регулярно відстежувати ріст і розвиток рослин, оцінюючи рівень їхньої приживлюваності, адаптацію до середовища та щільність покриву. Контроль гідрологічного режиму дає змогу запобігати застою води або ерозійним процесам, що можуть ускладнити відновлення території.

Здійснення довготривалого моніторингу дає змогу коригувати рекультиваційні заходи та адаптувати стратегію озеленення для досягнення максимального екологічного ефекту.

Висновки до розділу 5.

1.Опрацьовані технологічні аспекти відновлення екосистеми на порушених територіях хвостосховища Яворівського ДГХП «Сірка», що включають підготовку поверхні, вибір відповідних методів рекультивації та застосування біологічних технологій для покращення стану ґрунту та рослинності.

2.Основний акцент зроблено на екологічній безпеці та ефективності відновлювальних заходів. Виділено важливість формування родючого шару ґрунту, його структурування та збагачення корисними мікроорганізмами. Обґрунтовано необхідність інокуляції рослин бактеріальними препаратами для підвищення їхньої життєздатності та поліпшення агротехнічних характеристик ґрунту.

3.Догляд за рослинами та постійний екологічний моніторинг є важливими етапами рекультивації. Регулярний контроль за фізико-хімічними властивостями ґрунту, оцінка життєздатності рослин і контроль за станом водного режиму дозволяють коригувати відновлювальні процеси та забезпечують довготривалий ефект рекультиваційних заходів.

4.Реалізація запропонованих технологічних підходів сприяє відновленню екосистеми, підвищенню біорізноманіття та покращенню екологічного стану території. Це створює передумови для подальшого використання земель у господарській або природоохоронній діяльності.

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні розв'язане актуальне науково-практичне завдання: відновлення екосистеми техногенно-пошкодженої території ліквідованого сірко видобувного підприємства.

1. Теоретичні дослідження показали, що сірковидобувні підприємства мали значний негативний вплив на навколишнє середовище. Основними проблемами було забруднення повітря сірководнем та діоксидом сірки, забруднення водних ресурсів стічними водами із високим вмістом сірчаної кислоти та сульфатів, деградація ґрунтів. Негативні наслідки діяльності таких підприємств залишилися і після зупинки виробництва. Це зруйновані території кар'єрів і накопичувачів відходів (хвостосховищ).

2. Масштабне виробництво сірки флотаційним методом призвело до накопичення значних обсягів відходів у хвостосховищах, що становлять серйозну екологічну загрозу. Основними проблемами є хімічне забруднення води та ґрунту, утворення кислотного дренажу, виділення токсичних газів.

3. Аналіз результатів проведених експериментальних досліджень вказує на значну нерівномірність рослинного покриву території хвостосховища. Його центральна частина є найбільш забрудненою та деградованою, з низьким рівнем рослинного покриття та значними ознаками токсичного стресу у рослин.

4. Ґрунтовий покрив хвостосховища відзначається низькою пористістю (41,56%), що перешкоджає ефективному формуванню рослинного покриву. Показники густини поверхневого шару становить $1,42 \text{ кг/м}^3$, що унеможливорює розвиток деревної рослинності. Практична відсутність гумусу свідчить про низький рівень родючості ґрунту. Хімічний склад поверхневих порід демонструє високу концентрацію сірки (28,55%) і кальцію (68,83%). Це все вказує на значні відхилення від стану природних екосистем, характерних для резервату «Розточчя».

5. Центральна частина хвостосховища має найнижчі показники біотичного потенціалу самовідновлення, відповідно, природного самовідновлення

недостатньо для повної реабілітації екосистеми, тому необхідне проведення активних рекультиваційних заходів,.

6. Показано, що законодавство України та Європейського Союзу щодо рекультивації пошкоджених територій має на меті забезпечення екологічної безпеки та відновлення деградованих земель для їх подальшого продуктивного використання. Гармонізація з європейськими стандартами, зокрема через Угоду про асоціацію, сприяє удосконаленню законодавства та впровадженню принципів «забруднювач платить», що важливо для забезпечення сталого розвитку і екологічної безпеки.

7. Основний акцент зроблено на екологічній безпеці та ефективності відновлювальних заходів. Виділено важливість формування родючого шару ґрунту, його структурування та збагачення корисними мікроорганізмами. Обґрунтовано необхідність інокуляції рослин бактеріальними препаратами для підвищення їхньої життєздатності та поліпшення агротехнічних характеристик ґрунту. Інокуляцію рослин сумішами бактеріальних препаратів міковітал, планриз-біо, азотфіксатор, флорабацилін, молочна сироватка та добрива «агроболік універсал».

8. Проведена практична реалізація запропонованих технологічних рішень з рекультивації частини хвостосховища виробництва сірки флотаційним методом. На території площею 6000 м² була проведена геотехнічна підготовка, формування рекультиваційного шару та висаджено 600 саджанців сосни та 400 саджанців берези. Це створює передумови для повного відновлення природної екосистеми та подальшого використання земель у господарській або природоохоронній діяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Levyk, V., & Brzezińska, M. (2007). The state of soil cover on the territories of former sulphur mines “Yavoriv”(Ukraine) and “Machów”(Poland) from the standpoint of current research. *Acta Agrophysica*, 10(1), 149-157.
2. Schwarzenbach, R. P., Egli, T., Hofstetter, T. B., Von Gunten, U., & Wehrli, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annual review of environment and resources*, 35(1), 109-136.
3. Boak, R., & Beale, G. (2008). Mine Closure and Reclamation-Practical Examples of Options and Issues. *Mine Water and the Environment*, 119-122.
4. Bik-Małodzińska, M., Żukowska, G., & Paśmionka, I. (2023). Innovative technologies for the use of drilling waste in reclamation and shaping the physicochemical properties of degraded soils. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 17(3). 294-301
<https://doi.org/10.12913/22998624/166759>
5. Bik-Małodzińska, M., Żukowska, G., Paśmionka, I., Rybczyńska-Tkaczyk, K., & Jakubczyk, A. (2022). Assessment of the effectiveness of soil reclamation techniques degraded by the sulfur industry. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 16(5), 324-334.
6. González, V., García, I., Del Moral, F., De Haro, S., Sánchez, J. A., & Simón, M. (2011). Impact of unconfined sulphur-mine waste on a semi-arid environment (Almería, SE Spain). *Journal of environmental management*, 92(6), 1509-1519. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.001>
7. Mazurek, R., Kowalska, J., Gąsiorek, M., Zadrożny, P., Józefowska, A., Zaleski, T., ... & Orłowska, K. (2017). Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution. *Chemosphere*, 168, 839-850.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.126>

8. Ahirwal, J., & Pandey, V. C. (2021). Restoration of mine degraded land for sustainable environmental development. *Restoration Ecology*, 29(4), e13268. <https://doi.org/10.1111/rec.13268>
9. Münzel, T., Hahad, O., Daiber, A., & Landrigan, P. J. (2023). Soil and water pollution and human health: what should cardiologists worry about?. *Cardiovascular research*, 119(2), 440-449. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvac082>
10. Okereafor, U., Makhatha, M., Mekuto, L., Uche-Okereafor, N., Sebola, T., & Mavumengwana, V. (2020). Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *International journal of environmental research and public health*, 17(7), 2204. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072204>
11. Babuji, P., Thirumalaisamy, S., Duraisamy, K., & Periyasamy, G. (2023). Human health risks due to exposure to water pollution: A review. *Water* 15 (14): 2532. <https://doi.org/10.3390/w15142532>
12. Pohrebennyk, V. D., & Dzhumelia, E. A. (2019). Екологічна небезпека території гірничо-хімічних підприємств. Екологічна безпека та природокористування, 29(1), 40-53. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.1.40-53>
13. Saravanan, A., Kumar, P. S., Vo, D. V. N., Jeevanantham, S., Karishma, S., & Yaashikaa, P. R. (2021). A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: Microbial enzymes. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126451. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126451>
14. Ghule, M. R., & Ramteke, P. K. (2022). Soil chemical pollution and remediation. In *Hazardous and Trace Materials in Soil and Plants* (pp. 57-71). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91632-5.00025-2>
15. Jayakodi, S., Sivakugan, N., & To, P. (2023). Geotechnical considerations of mine tailings management through mine backfilling. In *Geoenvironmental and*

- geotechnical issues of coal mine overburden and mine tailings (pp. 1-30). Singapore: Springer Nature Singapore.
16. Zhengfu, B., & Kuangdi, X. (2022). Biological Measures for Mined Land Reclamation. In *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy* (pp. 1-2). Singapore: Springer Nature Singapore.
 17. Nosov, S., Svintsova, T., Bondarev, B., & Shvetsov, A. (2023, January). Land Reclamation as a Business Process of Municipal Waste Management. In *International Scientific Conference Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East* (pp. 407-418). Cham: Springer Nature Switzerland.
 18. Brusseau, M. L., Glenn, E. P., & Pepper, I. L. (2019). Reclamation and restoration of disturbed systems. In *Environmental and pollution science* (pp. 355-376). Academic Press.
 19. Мачуська, І. Б., Тітова, В. М., & Аргатюк, І. В. (2024). Рекультивація земель у сфері надрокористування в Україні: теоретико-правовий аналіз. *Аналітично-порівняльне правознавство*, (4), 271-275. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.04.42>
 20. Лісова, Т. В. (2017). Рекультивація земель як основний захід їх відновлення.
 21. Söderqvist, T., Brinkhoff, P., Norberg, T., Rosén, L., Back, P. E., & Norrman, J. (2015). Cost-benefit analysis as a part of sustainability assessment of remediation alternatives for contaminated land. *Journal of environmental management*, 157, 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.024>
 22. Bik-Małodzińska, M. (2024). The Impact of Waste Application on the Reclamation and Biological Life of Degraded Soils. *Sustainability*, 16(18), 8126. <https://doi.org/10.3390/su16188126>
 23. Shao, Y., Xu, Q., & Wei, X. (2023). Progress of mine land reclamation and ecological restoration research based on bibliometric analysis. *Sustainability*, 15(13), 10458. <https://doi.org/10.3390/su151310458>

24. Weiss, J., Burghardt, W., Gausmann, P., Haag, R., Haeupler, H., Hamann, M., ... & Stempelmann, I. (2005). Nature returns to abandoned industrial land: monitoring succession in urban-industrial woodlands in the German Ruhr. In *Wild urban woodlands: New perspectives for urban forestry* (pp. 143-162). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
25. Hauser, W. (2011). The Ruhr Museum at the Zollverein Colliery in Essen, Germany. *Technology and Culture*, 52(1), 171-179. <https://doi.org/10.2307/23020463>
26. Gerson, J. R., & Hinckley, E. L. S. (2023). It is time to develop sustainable management of agricultural sulfur. *Earth's Future*, 11(11), e2023EF003723. <https://doi.org/10.1029/2023EF003723>
27. Montanarella, L., Pennock, D., Mckenzie, N., Alavipanah, S. K., Alegre, J., Alshankiti, A., ... & Zhang, G. L. (2015). Status of the World's Soil Resources Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils: Italy. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (Technical Summary).
28. Guerra, C. A., Bardgett, R. D., Caon, L., Crowther, T. W., Delgado-Baquerizo, M., Montanarella, L., ... & Eisenhauer, N. (2021). Tracking, targeting, and conserving soil biodiversity. *Science*, 371(6526), 239-241. DOI: 10.1126/science.abd7926
29. Farrell, H. L., Léger, A., Breed, M. F., & Gornish, E. S. (2020). Restoration, soil organisms, and soil processes: emerging approaches. *Restoration Ecology*, 28, S307-S310. <https://doi.org/10.1111/rec.13237>
30. Likus-Cieřlik, J., & Pietrzykowski, M. (2021). Sulfur contamination and environmental effects: a case study of current SO₂ industrial emission by biomonitoring and regional post-mining hot-spots. *The Open Biotechnology Journal*, 15(1), 82-96. DOI:10.2174/1874070702115010082
31. Wang, X., Li, Y., Wei, Y., Meng, H., Cao, Y., Lead, J. R., & Hong, J. (2020). Effects of fertilization and reclamation time on soil bacterial communities in

- coal mining subsidence areas. *Science of the Total Environment*, 739, 139882.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139882>
32. Francioli, D., Schulz, E., Lentendu, G., Wubet, T., Buscot, F., & Reitz, T. (2016). Mineral vs. organic amendments: microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies. *Frontiers in microbiology*, 7, 1446.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01446>
33. Benison, K. C., & Bowen, B. B. (2013). Extreme sulfur-cycling in acid brine lake environments of Western Australia. *Chemical Geology*, 351, 154-167.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.018>
34. Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants/fourth editions. CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton, 505.
<https://doi.org/10.1201/9781420039900>
35. Rice, K. C., & Herman, J. S. (2012). Acidification of Earth: An assessment across mechanisms and scales. *Applied Geochemistry*, 27(1), 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.001>
36. Rousk, J., Bååth, E., Brookes, P. C., Lauber, C. L., Lozupone, C., Caporaso, J. G., ... & Fierer, N. (2010). Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME journal*, 4(10), 1340-1351.
<https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58>
37. Likus-Cieřlik, J., Pietrzykowski, M., & Chodak, M. (2018). Chemistry of sulfur-contaminated soil substrate from a former Frasch extraction method sulfur mine leachate with various forms of litter in a controlled experiment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 1-14.
38. Kellaway, E. J., Eimers, M. C., & Watmough, S. A. (2022). Liming legacy effects associated with the world's largest soil liming and regreening program in Sudbury, Ontario, Canada. *Science of The Total Environment*, 805, 150321.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150321>

39. Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in plant science*, 11, 359. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
40. Alvarenga, P., Gonçalves, A., Fernandes, R., De Varennes, A., Vallini, G., Duarte, E., et al. (2009). Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization:(I) Effects on soil chemical characteristics. *Chemosphere* 74, 1292–1300. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.063>
41. Prysedskyi, Y., & Mashtaler, O. (2021). Growth parameters of herbaceous plants on phosphogypsum dumps with using soil coverings based on sewage sludge. *Journal of Ecological Engineering* 2021, 22(4), 20–26 <https://doi.org/10.12911/22998993/134247>
42. Likus-Cieślik, J., Pietrzykowski, M., Śliwińska-Siuśta, M., Krzaklewski, W., & Szostak, M. (2015). A preliminary assessment of soil sulphur contamination and vegetations the vicinity of former boreholes on the afforested post-mine site Jeziórko. *Geology, Geophysics and Environment*, 41(4), 371-371. DOI:10.7494/geol.2015.41.4.371
43. Likus-Cieślik, J., & Pietrzykowski, M. (2017). Vegetation development and nutrients supply of trees in habitats with high sulfur concentration in reclaimed former sulfur mines Jeziórko (Southern Poland). *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 20556-20566. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9638-5>
44. Knoche, D., Embacher, A., & Katzur, J. (2000). Element dynamics of oak ecosystems on acid-sulphurous mine soils in the Lusatian lignite mining district (Eastern Germany). *Landscape and Urban Planning*, 51(2-4), 113-122. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00102-X)
45. Матіюк, С. М., & Грубінко, В. В. (2019). Використання природних та абсорбтивних субстанцій для очищення природних та стічних вод.

- Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія, (4), 69-85.
- 46.Маджд, С. М. (2016). Досвід експлуатації гідрофітних споруд в Україні та світі. *Наукоємні технології* № 2 (30), 2016, 228-231.
 - 47.Byl, T. D., Oniszczyk, R., Fall, D., Byl, P. K., & Bradley, M. (2023). Attenuation of acid rock drainage by stimulating sulfur-reducing bacteria. *Environmental Earth Sciences*, 82(9), 237.
 - 48.Ткачук, О. П., Шкатула, Ю. М., & Титаренко, О. М. (2020). Сільськогосподарська екологія. навч. посіб.-Вінниця: ВНАУ, 2020.-542 с./Рек. Вченою радою ВНАУ як навч. посіб. для студ. галузі знань 10 «Природничі науки» спец. 101 «Екологія», протокол № 5 від 29.11. 2019.
 - 49.Likus-Cieślik, J., Smoliński, A., Pietrzykowski, M., & Bąk, A. (2019). Sulphur contamination impact on seasonal and surface water chemistry on a reforested area of a former sulphur mine. *Land Degradation & Development*, 30(2), 212-225. <https://doi.org/10.1002/ldr.3216>
 - 50.Miao, Z., Brusseau, M. L., Carroll, K. C., Carreón-Diazconti, C., & Johnson, B. (2012). Sulfate reduction in groundwater: characterization and applications for remediation. *Environmental geochemistry and health*, 34, 539-550. <https://doi.org/10.1007/s10653-011-9423-1>.
 - 51.Gerson, J. R., & Hinckley, E. L. S. (2023). It is time to develop sustainable management of agricultural sulfur. *Earth's Future*, 11(11), e2023EF003723. <https://doi.org/10.1029/2023EF003723>
 - 52.Sołek-Podwika, K., Ciarkowska, K., & Kaleta, D. (2016). Assessment of the risk of pollution by sulfur compounds and heavy metals in soils located in the proximity of a disused for 20 years sulfur mine (SE Poland). *Journal of Environmental Management*, 180, 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.074>
 - 53.Oni, O., Sonibare, J., Fakinle, B., Oke, D., Odofin, O., Oladele, M., & Ikeh, M. (2024). Determination of Sulphur Dioxide Air Emission of Refined Petroleum

- Products by Emission Factor Approach for Air Pollution Control. *Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering*, 9(2), 46-55.
<https://doi.org/10.11648/j.jeece.20240902.11>
54. Chihana, S., Mbale, J., & Chaamwe, N. (2024). Unveiling the Nexus: Sulphur Dioxide Exposure, Proximity to Mining, and Respiratory Illnesses in Kankoyo: A Mixed-Methods Investigation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(7), 850.
<https://doi.org/10.3390/ijerph21070850>
55. Ebrahimi, M., & Qaderi, F. (2021). Determination of the most effective control methods of SO₂ pollution in Tehran based on adaptive neuro-fuzzy inference system. *Chemosphere*, 263, 128002.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128002>
56. Muma, D., Besa, B., Manchisi, J., & Banda, W. (2020). Effects of mining operations on air and water quality in Mufulira district of Zambia: A case study of Kankoyo Township. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 120(4), 287-298. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/952/2020>
57. Кузьменко, В. В., & Тимошенко, О. О. (2018). Мінеральні добрива у процесах рекультивації порушених ґрунтів. *Журнал агроекології*, 3, 72–78.
58. Ковальчук, І. В., & Тимошенко, Л. С. (2020). Використання біопрепаратів для рекультивації деградованих ґрунтів у землеробстві. *Агроекологічний журнал*, 3, 48–53.
59. Калініченко, А. В. (2018). Потенціал злакових видів для рекультивації ґрунтів гірничопромислових ландшафтів. *Агроекологічний журнал*, 4, 72–77.
60. Калінін, П. І., & Фролова, І. В. (2020). Фітомеліораційний потенціал деревно-чагарникової рослинності у рекультивації техногенних територій. *Агроекологічний журнал*, 3, 61–68.

- 61.ДСТУ ISO 10381-5:2009 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 5. Настанови з процедури дослідження міських і промислових ділянок щодо забрудненості ґрунту (ISO 10381-5:2005, IDT). ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 2. Настанови з методів відбирання проб
- 62.ДСТУ ISO 18512: Якість ґрунту. Настанови з довго та короткострокового зберігання зразків ґрунту (ISO 18512:2007, IDT).
- 63.ДСТУ ISO 10381-5: Якість ґрунту. Пробовідбирання. Частина 5. Настанови з процедури дослідження міських та промислових ділянок щодо забруднення ґрунту (ISO 10381-5:2005, IDT).
- 64.Тарас, У. М., & Марутяк, С. Б. (2013). Дослідження фізико-хімічного стану ґрунту на девастрованих землях у зоні діяльності яворівського державного гірничо-хімічного підприємства" сірка". *Науковий вісник НЛТУ України*, 23(14), 56-62.
- 65.Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни "Ґрунтознавство" для студентів денної і заочної форми навчання спеціальності 101 «Екологія» Укладач: Клименко Т.К., Ненашева О.І. – Кам'янське, ДДТУ, 2017 р. – 24с.
- 66.Muckel, G. B., & Mausbach, M. J. (1997). Soil quality information sheets. Methods for assessing soil quality, 49, 393-400.
- 67.ДСТУ ISO 11272-2001 Якість ґрунту. Визначання щільності складення на суху масу (ISO 11272:1998, IDT).
- 68.Дідух, О. І., Мальований, М. С., & Шпаківська, І. М. (2008). Фізичні властивості ґрунтів у межах посттехногенного ландшафту Яворівського ДГХП "Сірка". *Вісн. нац. ун-ту „Львівська політехніка*, 69, 225-233.
- 69.Практикум для використання лабораторних робіт / С.Б. Марутяк, А.П. Дида, Я.В. Генік, І.В. Хміль. – Львів, 2011. – 51 с.
- 70.Randrup, T. B. (1997). Soil compaction on construction sites. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 23(5), 207-210.

- 71.Казюта, А. А. (2016). Щільність складення і твердої фази чорнозему типового різного типу використання.
- 72.ДСТУ ISO 10390:2001 Якість ґрунту. Визначання рН (ISO 10390:1994, IDT).
- 73.ДСТУ 7862:2015 Якість ґрунту. Визначення активної кислотності.
- 74.ДСТУ 8346:2015 Якість ґрунту. Методи визначення питомої електропровідності, рН і щільного залишку водної витяжки.
- 75.Біосферний резерват «Розточчя» / ред.-упоряд. С. Стойко, А.-Т. Башта, Ю. Зінько, М. Гарасім'юк. Львів: ЗУКЦ, 2015. 224 с.
- 76.Про припинення Яворівського державного гірничо-хімічного підприємства "Сірка". Наказ міністерства промислової політики України 27.06.2006 № 230. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0230581-06#Text>
- 77.Постанова КМУ № 442 від 21.06.1995 Про розв'язання соціально-економічних та екологічних проблем у Яворівському та Жидачівському районах Львівської області. https://zakononline.com.ua/documents/show/176837___176902?utm_source=chatgpt.com
- 78.Розпорядження КМУ від 24 лютого 2003 р. № 87-р. Про затвердження проекту відновлення екологічної рівноваги та рекультивації порушених гірничими роботами земель Яворівського державного гірничо-хімічного підприємства "Сірка". <https://www.kmu.gov.ua/npas/152879?>
- 79.Геник, Я. В., & Заячук, В. Я. (2013). Сукцесії рослинності на посттехногенних територіях зони діяльності яворівського державного гірничо-хімічного підприємства "сірка". *Науковий вісник НЛТУ України*, 23(16), 93-99.
- 80.Білан Н. М., Чернявська Т. Є. Відновлення техногенно-порушених територій: сучасний стан та перспективи. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2019.
- 81.Державна служба геології та надр України. Екологічна оцінка стану земель після видобутку корисних копалин. – К.: 2021.

82. LaRue, E. A., Hardiman, B. S., Elliott, J. M., & Fei, S. (2019). Structural diversity as a predictor of ecosystem function. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114011.
83. Hou, H., & Shi, Y. (2021). Ecosystem-as-structure and ecosystem-as-coevolution: A constructive examination. *Technovation*, 100, 102193.
84. Dzhumelia O. "Environmental assessment of sulfur tailings storage facilities in Rozdil" // Lviv Polytechnic National University, 2021. [Доступ:](<https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/radaphd/7433/disertationdzhumelia>).
85. Assessment of Environmental and Social Risks of Tailings Storage Facilities in the Dniester River Basin // GEF Project Report, 2020. [Доступ:](https://media.voog.com/0000/0036/1658/files/Ukr_SUMMARY_Dniester-TSFs_for-publication_GEF-project.pdf)
86. Андрєєв В. Ю., Пилипенко О. В. "Екологічні аспекти функціонування хвостосховищ сірчаного виробництва" // Журнал «Безпека життєдіяльності», 2019.
87. ДБН В.2.4-5:2012 – Гідротехнічні споруди. Основні положення проєктування.
88. Ковальчук І. П., Колісник С. І. "Лісомеліоративні аспекти рекультивації порушених земель" // Науковий вісник НЛТУ України, 2016.
89. Мельник В. І. "Рекультивація та відновлення родючості ґрунтів" // Вісник аграрної науки, 2015.
90. Аналітичний звіт "Оцінка впливу відходів сірчаного виробництва на навколишнє середовище" // Інститут геохімії НАН України, 2018.
91. Technogenic Impact of Sulfur Mining and Methods of Reclamation // Core.ac.uk, 2017. [Доступ:](<https://core.ac.uk/download/pdf/153582086.pdf>)
92. Романчук Л.Д., Ціпан Ю.Р., Грицюк В.В., Миронець М.А. Зміни екосистемних послуг ґрунту під впливом антропогенних факторів /

- Таврійський науковий вісник, 2022р. № 127. С.391-399.
<https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.127.50>.
- 93.Безплатня, Л. О., Матківський, М. П., & Лозінська, Т. П. (2024). Біорізноманіття як основа екосистемних послуг: оцінка, збереження та відновлення/ Таврійський науковий вісник, 2024р. № 135. Частина 1 С.12-19. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.2>.
 - 94.Beaury, E. M., Finn, J. T., Corbin, J. D., Barr, V., & Bradley, B. A. (2020). Biotic resistance to invasion is ubiquitous across ecosystems of the United States. *Ecology Letters*, 23(3), 476-482.
 - 95.Xiong, W., Jousset, A., Li, R., Delgado-Baquerizo, M., Bahram, M., Logares, R., ... & Geisen, S. (2021). A global overview of the trophic structure within microbiomes across ecosystems. *Environment International*, 151, 106438.
 - 96.Loch, J. M., Walters, L. J., & Cook, G. S. (2020). Recovering trophic structure through habitat restoration: A review. *Food Webs*, 25, e00162.
 - 97.Андрійчук В. М. Розточчя: природні комплекси та біорізноманіття. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2018.
 - 98.Головач О. Л. Вплив техногенної діяльності на ландшафти Яворівщини. – Геоекологічний журнал, 2020.
 - 99.Природний заповідник "Розточчя": охорона та відновлення біорізноманіття / Під ред. М. Ковальчука. – Київ: Наукова думка, 2021.
 - 100.Бродович Т. С. Геохімічні особливості ґрунтів Яворівського промислового району. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2019.
 - 101.Шевчук В. Г. Вплив кислотних водойм на гідробіонтів у зоні техногенного впливу. – Екологічний журнал, 2022.
 - 102.Дослідження екологічного стану техногенних територій Львівщини / Колектив авторів. – Львів: Наукова думка, 2023.
 - 103.Nahursky, O., Vykhyivska, K., Krylova, H., Vasiichuk, V., Kachan, S., Nahursky, A., ... & Orobchuk, O. (2025). Study of ecosystem edaphic components in the tailings storage of a decommissioned sulfur mining

- enterprise. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(4), 70-75. <https://doi.org/10.12912/27197050/200623>
104. Karolina Furtak, Anna Gałazka (2019). Edaphic Factors And Their Influence On The Microbiological Biodiversity Of The Soil Environment // *Advancements of Microbiology*. V. 58. – P. 375 – 384. DOI: <https://doi.org/10.21307/PM-2019.58.4.375>
105. Kateryna Baraban, Mykola Prykhodko (2024). Ecological Safety of Soils from Abandoned Mines of the Lviv-Volyn Coal Basin (on the Example of Chervonohrad Mining and Industrial District) // *Ecol. Eng. Environ. Technol.* 2024; 11:241-250. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/192735>
- 106.. Magdalena Tarnawczyk, Łukasz Uzarowicz, Katarzyna Perkowska-Pióro, Artur Pędziwiatr, Wojciech Kwasowski (2021) Effect of Land Reclamation on Soil Properties, Mineralogy and Trace-Element Distribution and Availability: The Example of Technosols Developed on the Tailing Disposal Site of an Abandoned Zn and Pb Mine // *Minerals* 2021, 11(6), 559; <https://doi.org/10.3390/min11060559>
107. Viktorija Oliferchuk, Nataliia Kendzora, Nataliya Hotsii, Igor Shukel, Oksana Olejniuk-Puchniak, Mariia Samarska, Oleg Nagurskyy, Viktor Vasiichuk. Soil Microscopic Fungi in the Territories of Yavoriv and Podorozhenie Sulfur Quarries (2023). *Ecological Engineering and Environmental Technology* This link is disabled., 2023, 24(3), pp. 120–134. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/159629>
108. Lidiya Pavlovna Stepanova et al. Agroecological assessment of the effectiveness of different systems of soil protection measures in the reproduction of fertility of slope gray forest soils (2021). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 723 032104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032104>
109. Дідух О.І. Фізичні властивості ґрунтів у межах посттехногенного ландшафту Яворівського ДГХП "Сірка" / О.І. Дідух, М.С. Мальований,

- І.М. Шпаківська // НУ "ЛП", Ін-т екології Карпат НАН України. – Львів, 2008. – 11 с.
- 110.Dent, D., Boincean, B. P., Krupenikov, I. A., Krupenikov, I. A., Boincean, B. P., & Dent, D. (2011). Soil mineralogy and elemental composition. *The Black Earth: Ecological Principles for Sustainable Agriculture on Chernozem Soils*, 27-32.
 - 111.Гаськевич В. Г. Валовий хімічний склад дерново-підзолистих ґрунтів Надсянської рівнини / В. Г. Гаськевич, О. З. Луцишин // Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. - 2016. - Вип. 88(1). - С. 145-155.
 - 112.Moldovan, O. T., Meleg, I. N., & Levei, E.-A. (2013). A simple method for assessing biotic indicators and predicting biodiversity in the hyporheic zone of a river polluted with metals. *Ecological Indicators*, 24, 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.019>
 - 113.Цілі Сталого Розвитку: Україна. Національна доповідь 2017. http://un.org.ua/images/SDGs_NationalReportUA_Web_1.pdf (електронний ресурс)
 - 114.Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019> (електронний ресурс)
 - 115.Korbut, M., Malovanyy, M., Luchyt, L., & Vykhivska, K. Implementation of European union directives on waste management into Ukrainian legislation within the association agreement. ENVIRONMENTAL PROBLEMS Vol. 9, No. 2, 2024. *Journal Environmental Problems*, 9(2), 101-108. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.101>
 - 116.Черняєва, О. П., Золенко, І. П., Лещенко, Д. Є., & Хом'як, І. В. (2022). Відновлення природної рослинності на порушених екотопах-основа для тератрансформаційних моделей. Ураїнське Полісся: проблеми та тренди сучасного розвитку, 56-59.

- 117.Хом'як, І. В., Брень, А. Л., Медвідь, О. В., Хом'як, А. К., & Максименко, І. Ю. (2023). Динаміка рослинності суходолу на території кар'єрів як модель постмілітарного відновлення дикої природи. Український журнал природничих наук, (5), 61-69.
- 118.Бондаренко В.І., Стеценко В.В. Відновлення рослинності на техногенно-порушених землях гірничо-видобувної промисловості // Екологія та природокористування. – 2021. – № 3(45). – С. 56–68.
- 119.Давиденко О.М. Екологічна рекультивація земель після видобутку корисних копалин // Вісник екологічної безпеки. – 2019. – Т. 27. – № 2. – С. 112–125.
- 120.Захаров С.М., Ткаченко Л.О. Вплив гірничих підприємств на стан рослинного покриву та шляхи його відновлення // Науковий вісник гірничо-металургійного комплексу України. – 2020. – № 5(98). – С. 73–85.
- 121.Іванченко П.М., Лисенко К.С. Біологічні методи рекультивації земель, порушених гірничодобувною діяльністю // Журнал екологічних досліджень та природоохоронної діяльності. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 34–47.
- 122.Коваленко О.В., Петренко М.Г. Відновлення рослинності на відвалах вуглевидобувних підприємств Донбасу // Геоекологія і природокористування. – 2018. – № 1(22). – С. 89–103.
- 123.Павленко Ю.В. Антропогенні фактори, що впливають на швидкість відновлення рослинності на територіях гірничих підприємств // Вісник Дніпровського національного університету. – 2017. – № 4(60). – С. 147–158.
- 124.Тараненко В.Ф., Корнієнко Л.Ю. Відновлення лісової рослинності на територіях, порушених видобутком залізної руди // Лісівництво і агролісомеліорація. – 2020. – № 3(98). – С. 65–78.

- 125.Шевченко О.О. Біологічна рекультивація земель, порушених гірничими роботами: сучасні тенденції // Український журнал екології. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 23–34.
- 126.Яковенко І.П. Оцінка ефективності відновлення рослинності на територіях вугільних шахт та кар'єрів // Гірнича екологія та промислова безпека. – 2022. – № 5(31). – С. 77–89.
- 127.Сидоренко Н.А., Гуменюк Т.І. Вплив кліматичних умов на ефективність рекультивації відвалів вугільної промисловості // Екологічний журнал України. – 2021. – № 2(49). – С. 98–110.
- 128.Nahursky, O., Vykhyvska, K., Krylova, H., Vasiichuk, V., Kachan, S., Nahursky, A., ... & Orobchuk, O. (2025). Study of ecosystem edaphic components in the tailings storage of a decommissioned sulfur mining enterprise. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(4), 70-75. <https://doi.org/10.12912/27197050/200623>
- 129.Oliferchuk, V., Kendzora, N., Hotsii, N., Shukel, I., Olejniuk-Puchniak, O., Samarska, M., Nagursky, O., & Vasiichuk, V. (2023). Changes in the structure of soil microscopic fungi in the territories of Yavoriv and Podorozhenie sulfur quarries. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(3), 120–134. <https://doi.org/10.12912/27197050/159629>
- 130.Oliferchuk, V., Samarska, M., Nagursky, O., Vasiichuk, V., & Vykhyvska, K. (2023). Reclamation of technogenically damaged territories of a sulfur production enterprise using the method of stimulating microisogenesis in plants. *Ecology and Sustainable Development. Environmental Protection*. In 4th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings (pp. 221–223). Lviv Polytechnic National University. <https://doi.org/10.23939/cte2023.221>
- 131.ДСТУ 8757:2017 – "Охорона природи. Рекультивація порушених земель. Загальні вимоги"

ДОДАТКИ

Проректор
Науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
_____ Давидчак О.Р.
_____ 2025 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі
Національного університету «Львівська політехніка»
результатів досліджень та розробок,
одержаних при виконанні дисертаційної роботи
«Рекультивация техногенно пошкоджених територій в межах біосферного
резервату «Розточчя»»
Вихівської Катерини Миколаївни

Комісія у складі:

- голова науково-методичної ради ІСТР ім. В'ячеслава Чорновола,
к.е.н., доц. Данько Т.І.
- зав. каф. ЦБ д.т.н., проф. Нагурський О.А.
- к.т.н., доц. Корчак Б.О.
- к.т.н., доц. Васійчук В.О.

цим актом підтверджує, що основні положення та результати дисертаційної роботи «Рекультивация техногенно пошкоджених територій в межах біосферного резервату «Розточчя»» Вихівської Катерини Миколаївни на

здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101. Екологія будуть використані:

1. У програмі лекційного курсу «Промислова екологія», а саме у розділі «Захист земельних ресурсів», оскільки отримані результати стосуються забруднення територій накопичувачами відходів та їх рекультивації.
2. Рекомендується за результатами дисертаційної роботи розробити практичну роботу щодо дослідження біотичного потенціалу пост техногенних екосистем.

Голова НМР ІСТР

к.е.н., доц. Данько Т.І.

Члени комісії:

- зав. каф. ЦБ д.т.н., проф. Нагурський О.А.

- к.т.н., доц. Корчак Б.О.

- к.т.н., доц. Васійчук В.О.



Проректор

науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

Олег ДАВИДЧАК

10. 02. 2025 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі
Національного університету «Львівська політехніка»
результатів досліджень та розробок,
одержаних при виконанні дисертаційної роботи
«Рекультивація техногенно пошкоджених територій в межах біосферного
резервату «Розточчя»»
Вихівської Катерини Миколаївни

Комісія у складі:

- голова науково-методичної ради ІСТР ім. В'ячеслава Чорновола,
к.е.н., доц. Тетяна ДАНЬКО,
- зав. каф. ЦБ д.т.н., проф. Олег НАГУРСЬКИЙ,
- к.т.н., доц. Богдан КОРЧАК,
- к.т.н., доц. Віктор ВАСІЙЧУК

цим актом підтверджує, що основні положення та результати дисертаційної роботи «Рекультивація техногенно пошкоджених територій в межах біосферного резервату «Розточчя»» Вихівської Катерини Миколаївни на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101. Екологія будуть використані:

1. У програмі лекційного курсу «Промислова екологія», а саме у розділі «Захист земельних ресурсів», оскільки отримані результати стосуються забруднення територій накопичувачами відходів та їх рекультивації.
2. Рекомендується за результатами дисертаційної роботи розробити практичну роботу щодо дослідження біотичного потенціалу пост техногенних екосистем.

Голова НМР ІСТР

к.е.н., доц. Тетяна ДАНЬКО

Члени комісії:

- зав. каф. ЦБ д.т.н., проф. Олег НАГУРСЬКИЙ

- к.т.н., доц. Богдан КОРЧАК

- к.т.н., доц. Віктор ВАСІЙЧУК

